

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Roman Kuzmić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Roman Kuzmić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc Draženu Lončaru i mag.ing. Anti Marušiću koji su me usmjeravali prilikom izrade ovog rada.

Roman Kuzmić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Roman Kuzmić**

Mat. br.: 0035199073

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamičke značajke termoklinskog toplinskog spremnika 4 MWh**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dynamics characteristics of thermocline heat storage 4 MWh**

Opis zadatka:

Obnovljeno zanimanje za razvojem i izgradnjom solarnih termoelektrana potaknulo je intenzivniji tehnološki razvoj praćen razvojem tehničkih rješenja za pohranu toplinske energije. Većina izvedenih postrojenja koristi tehnologiju „dvostrukih spremnika“ ali se u sve većoj mjeri razvijaju i ispituju različita alternativna rješenja. U termoklinskim spremnicima topline se, umjesto konstrukcijski izvedenog razdvajanja toplog i hladnog fluida, koristi sila uzgona. U cilju poboljšanja dinamičkih svojstava, usmjeravanja strujanja uzrokovano prirodnom konvekcijom i smanjenja cijene, termoklinski spremnici se ispunjavaju i sekundarnim materijalom visoke poroznosti.

U okviru rada potrebno je:

1. Prikazati različite izvedbe termoklinskih spremnika koje se koriste za pohranu energije u solarnim termoelektranama;
2. Razviti matematički model punjenja i pražnjenja termoklinskog spremnika toplinskog kapaciteta 4 MWh sa sekundarnim materijalom;
3. Usporediti odzive punjenja i pražnjenja spremnika kod korištenja različitih materijala (primarnih i sekundarnih).

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD .....	1
2. KONCENTRIRAJUĆA SOLARNA TERMOELEKTRANA (CSP).....	3
2.1. Parabolični kolektori.....	4
2.2. Zatvoreni parabolični kolektori.....	5
2.3. Solarni tornjevi.....	6
2.4. Fresnel reflektori.....	7
2.5. Stirling tanjuri.....	7
3. TOPLINSKI SPREMNICI.....	8
3.1. Spremnici osjetne topline.....	9
3.4. Spremnici latentne topline.....	9
3.4. Spremnici topline temeljeni na kemijskoj reakciji.....	9
4. TERMOKLINSKI TOPLINSKI SPREMNIK.....	11
4.1. Izvedbe termoklinskih spremnika.....	13
5. MATEMATIČKI MODEL.....	14
5.1. Dimenzioniranje spremnika.....	17
5.2. Temperaturni profil i termoklinski efekt.....	19
6. REZULTATI PRORAČUNA.....	22

---

6.1. Usporedba materijala.....	23
7. ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA.....	31
PRILOZI.....	32

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Karta s podacima o raspoloživoj solarnoj energiji.....	1
Slika 2.	Shema paraboličnog kolektora.....	4
Slika 3.	Zatvoreni parabolični kolektori.....	5
Slika 4.	Shema solarne termoelektrane s tornjem.....	6
Slika 5.	Shematski prikaz procesa u solarnoj termoelektrani.....	10
Slika 6.	Termoklinski toplinski spremnik i ciklusi.....	11
Slika 7.	Temperaturni profil termoklina.....	12
Slika 8.	Diskretizacija spremnika.....	15
Slika 9.	Odziv izlazne temperature tijekom pražnjenja.....	18
Slika 10.	Ciklus pražnjenja.....	19
Slika 11.	Profil termoklina kod pražnjenja spremnika.....	20
Slika 12.	Profil termoklina kod punjenja.....	20
Slika 13.	Učinkovitost pohrane energije.....	22
Slika 14.	Utjecaj poroznosti na odziv temperature.....	23
Slika 15.	Proces pražnjenja sa Solarnom soli.....	24
Slika 16.	Proces pražnjenja s Termouljem.....	25
Slika 17.	Vremenski odziv izlazne temperature (Termoulje).....	26
Slika 18.	Proces pražnjenja s HITEC-om.....	27
Slika 19.	Vremenski odziv izlazne temperature (HITEC).....	28
Slika 20.	Pražnjenje, Solarna sol i kvarcit.....	28
Slika 21.	Usporedba odziva sa svim materijalima.....	29

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Instalirane snage CSP elektrana

Tablica 2. Usporedba svojstava pohrambenog medija



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
d	m	Ekvivalentni promjer sekundara
H	m	Visina spremnika
K	W/mK	Koeficijent prijelaza topline
m	kg/s	Maseni tok fluida
t	s	Vrijeme
R	m	Polumjer spremnika
S	m	Površina izmjene topline sa sekundarom izražena po duljini spremnika
U	m/s	Prosječna brzina strujanja fluida
z	m	Visinski položaj kontrolnog volumena
Re		Reynoldsov broj
Pr		Prandtlov broj
θ	°C	Temperatura
ε		Volumna poroznost
μ	kg/m-s	Dinamička viskoznost
M <sub>f,i</sub>	kg	Masa fluida u i-tom kontrolnom volumenu
e	J/s	Tok energije
Φ	MW	Toplinski tok iz termoklinskog spremnika
E <sub>T</sub>	MWh	Kapacitet termoklinskog spremnika
V	m <sup>3</sup>	Volumen spremnika
λ	W/m-K	Toplinska provodljivost sekundara

### *Indeksi*

f	fluid
s	sekundar
h	hladni medij
t	topli medij
u	ulazni medij
i	izlazni medij

## SAŽETAK

Ovaj rad bavi se osvrtnom na izvedbe termoklinskih toplinskih spremnika kao novog oblika pohrane toplinske energije u solarnim termoelektranama. U radu je izveden pojednostavljeni matematički model koji opisuje rad spremnika prilikom procesa punjenja i pražnjenja. Također, prikazat će se usporedbe i utjecaj različitih parametara na rad spremnika poput drugih materijala primara i sekundara te različite poroznosti. Razmatra se i vrijeme potrebno za izvršavanje ciklusa punjenja pa tako i pražnjenja spremnika.

Ključne riječi: Sunčeva energija, solarna termoelektrana, toplinski spremnik, termoklinski spremnik topline

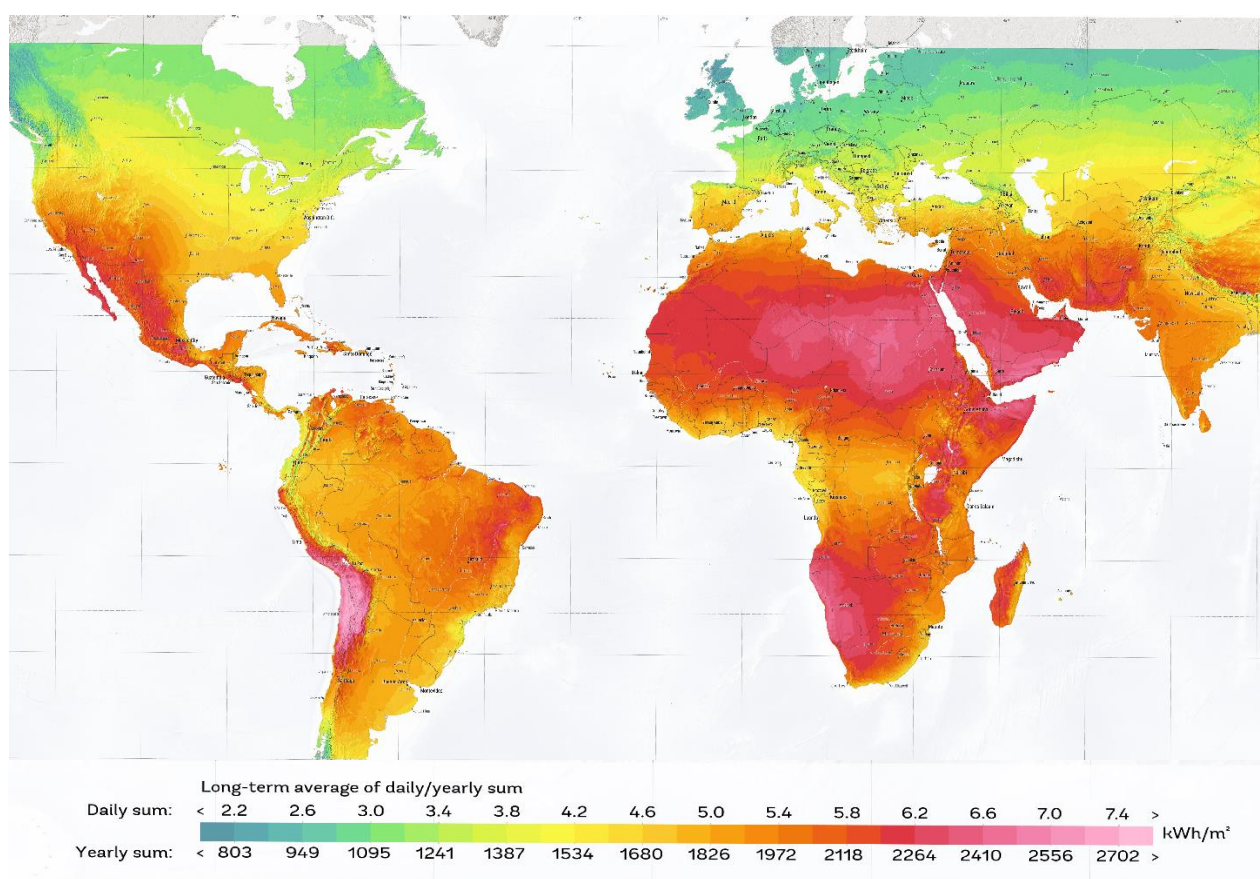
## SUMMARY

This article addresses the topic of thermocline heat storage intended for use in solar thermal powerplant and provides a simplified numerical model to describe the working behaviour of the tank including charging and discharging process. Different values and properties of both primary and secondary material will be tested to show what kind of effect do they have on working properties of the storage system. Different times needed for charging and discharging will also be evaluated.

Key words: solar energy, solar powerplant, thermal energy storage, thermocline heat storage

## 1. UVOD

Proizvodnja električne energije u 21. stoljeću sastoji se od strateškog rasporeda između postojećih konvencionalnih elektrana te novih elektrana pogonjenih alternativnim izvorima energije (vjetrom, geotermalnom energijom, biomasom, Sunčevom energijom). Uzmemo li u razmatranje Sunce kao nepresušan besplatni izvor energije, možemo vidjeti koliko je taj izvor izdašan na karti s globalnim vrijednostima energije dostupne od Sunčeva zračenja (slika 1). Tehnologije namijenjene iskorištavanju solarne energije u svrhu proizvodnje električne energije razvijale su se od 1976. godine do danas te su u velikoj mjeri primjenjivane i primjenjuju se diljem svijeta. Usprkos velikom potencijalu, doprinos solarne energije na ukupnom energetsom tržištu još uvijek je neznatan [1].



*Slika 1. Karta s podacima o raspoloživoj solarnoj energiji*

Iskorištavanje Sunčeve energije za proizvodnju struje danas se odvija na 2 načina:

1. pretvaranjem prvo u toplinsku energiju koja kasnije služi kao izvor topline u generatoru pare u Rankineovom ciklusu i
2. direktno preko fotonaponskih ćelija.

Fotonaponske (engl. Photo Voltaic - PV) ćelije rade bez pokretnih dijelova; proizvedene su od tankih pločica kristaličnog silicija s primjesom arsena te se ponašaju poput poluvodičkih spojeva. Atomi silicija otpuštaju svoje elektrone nakon kontakta s fotonima (svjetlosnim česticama Sunčevog zračenja) koji se grupiraju na jednom poluvodiču čineći tako drugi poluvodič okružen pozitivno nabijenim česticama. Zbog razlike u naboju na poluvodičima te ako su poluvodiči spojeni na negativnu i pozitivnu stranu strujnog kruga, tim krugom će protjecati struja.

Korištenje fotonaponskih modula kao izvora električne energije tijekom zadnjih par desetljeća u značajnom je porastu zbog sve manjih cijena instalirane snage te sve veće iskoristivosti. Snage nedavno instaliranih solarnih fotonaponskih elektrana sežu i do preko 1 GW, a vodeće zemlje posljednjih godina u proizvodnji elektrana s ovim izvorom energije nemjerljivo su Kina, SAD, Indija te Brazil [2]. Međutim, problem nastaje ako želimo kontinuitet proizvodnje energije iz takve vrste postrojenja, a koji se javlja kod većine alternativnih izvora. Ovaj problem bi se mogao riješiti skladištenjem električne energije, no ono nije najpovoljnije niti najefikasnije za fotonaponske elektrane jer je pohrana električne energije u baterijama priželjkivanih, velikih kapaciteta još uvijek skupa.

Stoga se zadnjih godina počelo opet razmatrati i razvijati postrojenje koje će iskorištavati Sunčevu energiju za proizvodnju struje na indirektan način, pretvarajući ju prvo u toplinsku energiju čija je pohrana mnogo isplativija i jednostavnija te zahtijeva manje prostora. Takvo postrojenje je solarna termoelektrana.

Solarna termoelektrana zasniva se na principu korištenja prijenosnog medija (termoulja) za transport topline iz solarnih kolektora do generatora pare te za skladištenje toplinske energije u spremnicima kako bi se mogla iskoristiti kada ne postoji dostupnog Sunčevog zračenja.

## 2. KONCENTRIRAJUĆA SOLARNA TERMoeLEKTRANA (CSP)

U termoelektrani bilo koje vrste teži se što višim parametrima radnog medija, stoga se u solarnoj termoelektrani ne može koristiti čisto direktno zračenje Sunca jer bi postignute temperature tako grijanog medija bile preniske, već se ono mora koncentrirati na neki način. Najčešći oblik solarnih termoelektrana s najvišim iskoristivostima i temperaturama radnog medija su koncentrirajuće termoelektrane (engl. CSP=concentrating solar power) koje koriste leće i/ili zrcala kako bi fokusirale Sunčevu energiju s velikih površina na malu površinu.

CSP elektrane u prvom razdoblju nastajanja razvijane su kao alternativa fotonaponskim ćelijama te su se gradile bez toplinskih spremnika, ali neuspješno jer se snaga iz fotonaponskih elektrana prodavala po jednoj trećini cijene CSP elektrana. Tek kad su se CSP termoelektrane počele proizvoditi s 3 do 12 sati spremljene toplinske energije počele su konkurirati na energetskom tržištu te postale najjeftiniji oblik kontinuirane solarne elektrane većih razmjera. U usporedbi s fotonaponskim kontinuiranim rješenjima i baterijama, cijena im je oko 10 puta manja [3].

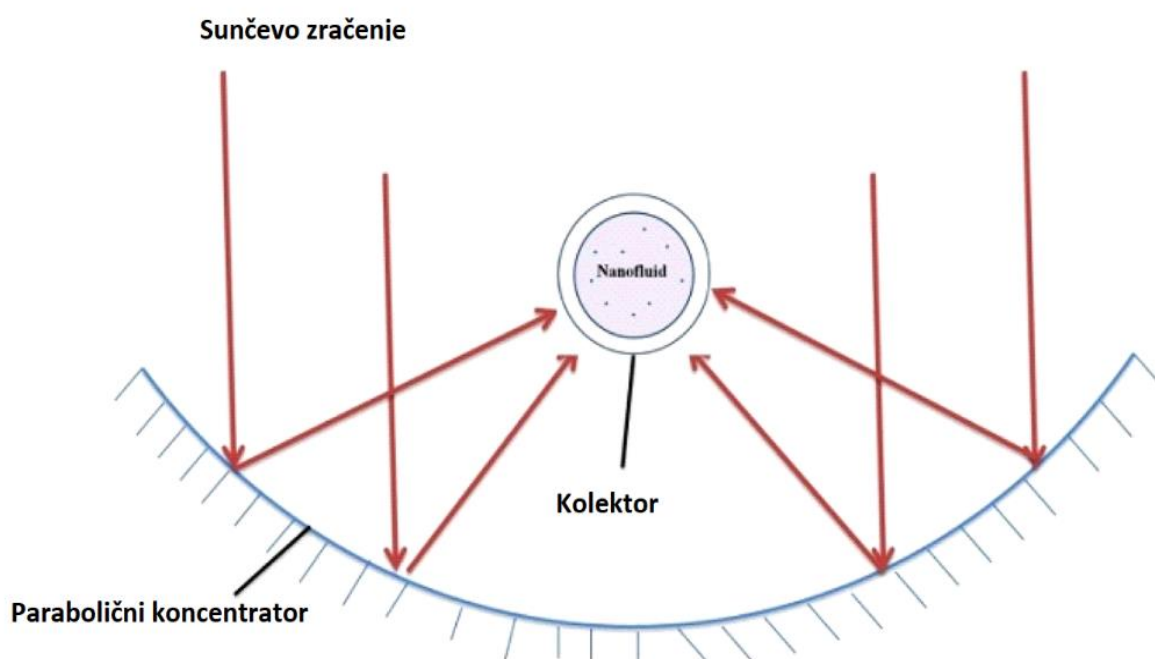
Obzirom na to da Sunce mijenja svoj položaj tijekom dana očito je da se zrcala i fokusni objekti moraju prilagođavati kako bi njihov fokus uvijek padao na projektiranu točku. Prema vrsti praćenja Sunčevog položaja i mehanizmu rada razlikuju se sljedeće izvedbe:

- parabolični kolektori
- zatvoreni parabolični kolektori
- solarni tornjevi
- Stirling tanjuri
- Fresnel reflektori

## 2.1. Parabolični kolektori

Parabolični kolektori koriste niz zakrivljenih zrcala posred kojih prolazi prozirna cijev (kolektor) na način da je pozicija cijevi točno u fokusu zrcala (vidljivo na slici 2). Položaj Sunca prati se jednostavnim zakretanjem u smjeru istok-zapad kako bi zračenje padalo direktno na zrcala. Praćenje po drugoj osi nije potrebno jer premještanjem Sunčeva položaja tijekom godine u smjeru sjever-jug ima za posljedicu samostalno gibanje fokusa zračenja na drugo mjesto duž kolektora. Postoji mogućnost zatvaranja kolektora u staklenu vakuumsku komoru, što znatno smanjuje konvektivne gubitke topline.

Fluid koji služi za akumulaciju topline prolazi kroz cijev/komoru te se zagrijava do visokih temperatura (400 °C za termoulje). Za fluid se mogu koristiti sintetičko ulje ili razne otopine soli. Fluid visoke temperature dalje se vodi u izmjenjivač topline za grijanje zraka koji odlazi u generator pare ili se pohranjuje u toplinske spremnike.



Slika 2. Shema paraboličnog kolektora

## 2.2. Zatvoreni parabolični kolektori

Zatvoreni parabolični kolektor temelji se na istom principu rada kao i parabolični kolektor samo što je cijeli sustav cijevi i zrcala smješten unutar stakleničke strukture (slika 3) koja sprječava da vanjski uvjeti poput prašine i vlage naruše korisnost, ali zato vanjska konstrukcija mora podnijeti vjetar. Naspram više stotina konstrukcija kod otvorenog tipa kolektora, u kolektoru zatvorenog tipa samo se vanjska konstrukcija mora bolje učvrstiti. Prema [4], u otvorenim paraboličnim kolektorima tijekom tjedna se izgubi na učinkovitosti sustava i do 30% zbog nakupljanja vlage i prašine periodično tijekom noći i dana prisiljavajući tako konstantno ispiranje kolektora vodom. Staklenički sustav za problem zaprljanja ima predviđeno automatsko pranje stakala pomoću reguliranih prskalica.



*Slika 3. Zatvoreni parabolični kolektori*



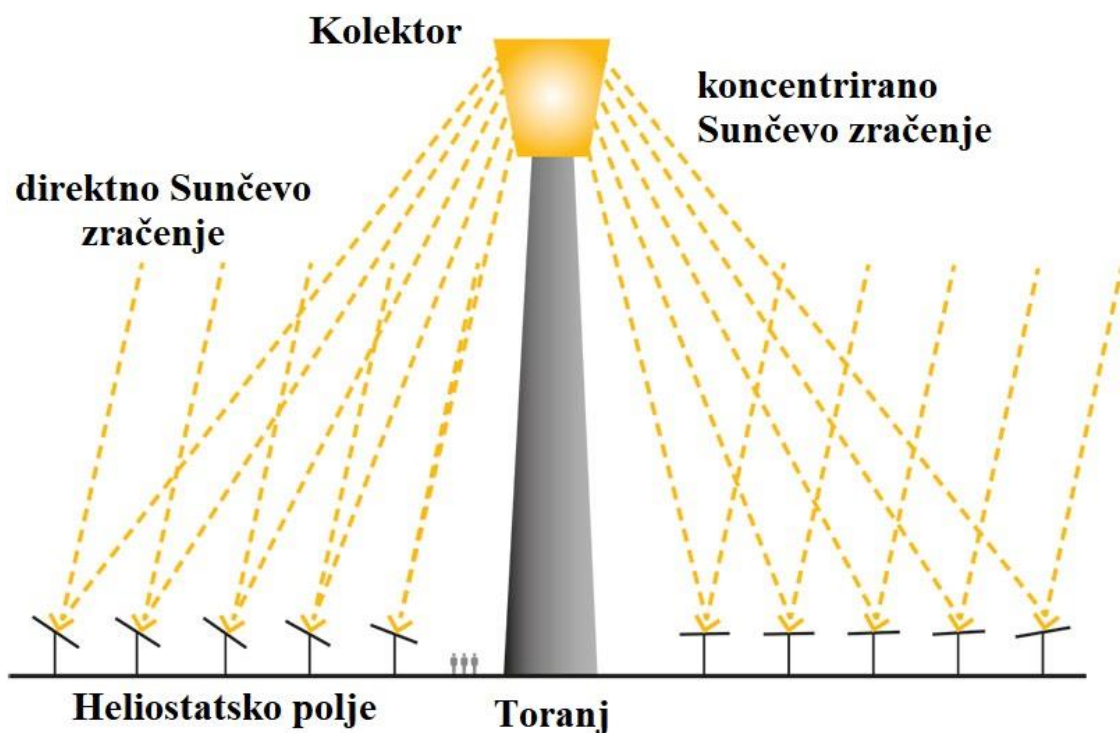
## 2.3. Solarni tornjevi

Solarni tornjevi su velike izvedbe solarnih kolektora koji koriste tisuće zrcala (heliostata) s mogućnošću praćenja Sunca za akumuliranje toplinske energije. Polja na kojima su instalirana zrcala znaju se prostirati na nekoliko četvornih kilometara. Na vrhu tornja fokusirano zračenje zagrijava solnu otopinu do 550 °C. Zagrijana otopina sprema se u toplinski spremnik čekajući svoju daljnu upotrebu u proizvodnji svježih pare za korištenje u Rankineovu ciklusu.

U usporedbi s paraboličnim kolektorima ovaj dizajn prednjači mogućim višim postignutim temperaturama koje dovode do većih stupnjeva iskoristivosti prilikom pretvorbe u električnu energiju te potrebnih manjih veličina toplinskih spremnika. Druga prednost je ta što površina na kojoj su instalirana zrcala ne mora biti ravna. Zrcala se na bilo kojem terenu mogu prilagoditi na način da reflektiraju zračenje u potrebnu točku.

Nedostatak ove izvedbe solarne termoelektrane jest to što svako od tih tisuću zrcala mora imati zasebni sustav praćenja, dok se u paraboličnim kolektorima jedan sustav koristi za veći broj zrcala.

Dosad najveći primjer ovakve solarne termoelektrane je Solarna termoelektrana Ivanpah i Californiji koji proizvodi električnu energiju snage 392 MW.



Slika 4. Shema solarne termoelektrane s tornjem

## 2.4. Fresnel reflektori

Fresnel reflektori načinjeni su od mnoštva tankih i ravnih zrcala koje koncentriraju zračenje na cijevi kroz koje struji radni medij. Jeftiniji su od paraboličnih reflektora te se mogu koristiti u različitim upotrebama i vrstama CSP elektrana. Nedostatak ovih kolektora je manja učinkovitost, ali ih se još uvijek koristi u velikoj mjeri zbog povoljne cijene.

## 2.5. Stirling tanjuri

U ovoj vrsti elektrane koriste se zrcala paraboličnog oblika pričvršćena na tanjurastu konstrukciju koja fokusiraju zračenje u kolektor pozicioniran u fokusnoj točki tanjura te zagrijavaju fluid koji se koristi u Stirlingovom motoru za proizvodnju struje.

Od navedenih izvedbi CSP termoelektrana sve osim Stirling tanjura već imaju praktične i učinkovite primjere skladištenja toplinske energije. Svi se zasnivaju na istom temeljnom principu. Energija akumulirana u radnom mediju tijekom prolaska kroz kolektore sprema se u toplinske spremnike kako bi se mogla koristiti u vrijeme vršnog opterećenja. Budući je razdoblje vršnog opterećenja u vremenu od 16 do 20 h tako se i toplinski spremnici dimenzioniraju na način da vrijeme eksploatacije skladištene energije bude 4-5 sati.

Kako je već navedeno, CSP elektrane pred sobom imaju još puno prostora za napredak jer u usporedbi s fotonaponskim elektranama imaju tek neznatan udio u proizvodnji struje. Ispod je prikazana tablica s vrijednostima instalirane snage CSP elektrana u svijetu [5].

Država	Ukupno [MW]
Španjolska	2,300
SAD	1,738
Indija	225
Južnoafrička Republika	200
Maroko	180
UAE	100
Alžir	25
Egipat	20
Australija	12
Kina	10
Tajland	5

Tablica 1. Instalirane snage CSP elektrana

### 3. TOPLINSKI SPREMNICI

Termodinamički sustav čiji je toplinski kapacitet dovoljno velik da u izmjeni topline s drugim sustavom ili okolinom održi stalnu temperaturu naziva se spremnik topline ili toplinski spremnik. Njegova se primjena nalazi u pohrani toplinske energije koja se može nakon toga koristiti satima, danima, čak i mjesecima nakon skladištenja. Postiže se i ušteda na energiji ako se spremnici pune za vrijeme niske potražnje, a prazne za vrijeme vršnog opterećenja.

Kapacitet spremnika ovisi o njegovoj veličini i mediju koji se u njemu nalazi pa tako i upotreba toplinskih spremnika može biti prikladna za snabdijevanje pojedinog procesa, više procesa, zgrada ili čak gradova. Neki primjeri upotrebe su uravnotežavanje energetske potražnje tijekom noći i dana, skladištenje topline tijekom ljeta za korištenje zimi ili skladištenje hladnog medija zimi za potrebe klimatizacije ljeti.

Za medij se može koristiti voda, termoulja, razne otopine na bazi soli, zemljane mase, beton ili kamen. Prema odabiru medija, toplinski spremnici se dijele na:

- spremnike osjetne topline
- spremnike latentne topline
- spremnike topline temeljene na povrativoj kemijskoj reakciji

	Medij za spremanje energije			
	Osjetno spremanje		Latentno spremanje	
Svojstvo	Kamen	Voda	Organsko	Anorgansko
Latentna topline [kJ/kg]	*	*	190	230
Specifični toplinski kapacitet [kJ/kg]	1.0	4.2	2.0	2.0
Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2240	1000	800	1600
Masa potrebna za spremanje 10 <sup>6</sup> kJ [kg]	67000	16000	5300	4350
Relativna potrebna masa	15	4	1.25	1.0
Potrebni volumen [m <sup>3</sup> ]	30	16	6.6	2.7
Relativni potrebni volumen	11	6	2.5	1.0

Tablica 2. Usporedba svojstava pohrambenog medija

\*latentna topline nije od značaja u spremnicima osjetne topline,

\*\*relativna masa i volumen se temelje na spremanju latentne topline kod anorganskih medija

U tablici 2 prikazana je usporedba potrebnog volumena kod različitih medija za spremanje  $10^6$  kJ=300 kWh energije uz  $\Delta T = 15$  K [6]. U nastavku ovog poglavlja pobliže je objašnjena svaka od triju mogućih vrsta medija za korištenje u spremanju toplinske energije.

### 3.1. Spremnici osjetne topline

Spremnici osjetne topline funkcioniraju na način da se određeni medij zagrijava te tako akumulira u sebi toplinsku energiju, a da pritom ne mijenja agregatno stanje. Spremanje i pražnjenje energija odvija se samo na temelju zagrijavanja i hlađenja medija (direktno iz izvora topline ili posredno preko nekog prijenosnog medija). Za pohranu energije mogu se koristiti kruti mediji (beton, kamen koji zahtijevaju neki prijenosni medij za izmjenu topline) ili mediji u tekućoj fazi poput otopina soli ili vode. Ovo je i najčešći te dosad najrazvijeniji oblik pohrane toplinske energije. Ovakvi spremnici se i najviše preporučaju za skladištenje energije prema [7].

### 3.2. Spremnici latentne topline

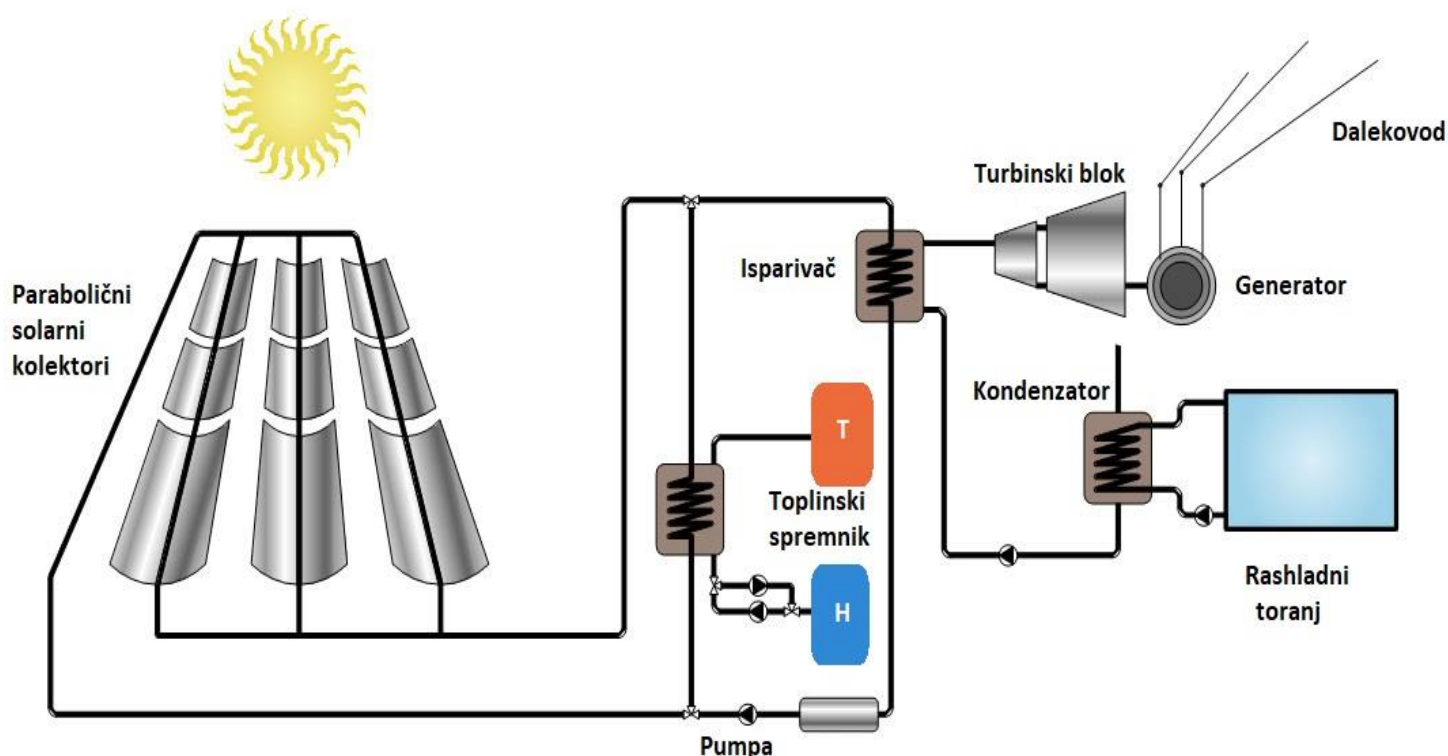
Koristi li se tijekom procesa punjenja/pražnjenja spremnika latentna topline medija tada se radi o spremnicima latentne topline. Energija koja se izmjenjuje tijekom punjenja spremnika koristi se za izmjenu faze medija te se tako smanjuje potrebna količina medija za pohranu energije pa tako i veličina spremnika, što je vidljivo u tablici 2. Nedostatak ovakve tehnologije je što se nakon određenog broja ciklusa inače visoki toplinski kapacitet korištenog medija počinje smanjivati te je potrebna izmjena medija. Najčešće bi se latentni materijal spremao u dugačke cijevi koje bi se ulagale u spremnik. Za vrijeme punjenja bi medij iz solarnih kolektora struja između latentnog medija te mu mijenjao agregatno stanje. Za vrijeme pražnjenja između latentnog medija bi strujao zrak koji bi se tako zagrijavao.

### 3.3. Spremnici temeljeni na kemijskoj reakciji

Endotermne kemijske reakcije zahtijevaju određenu toplinu za odvijanje pa se tako prilikom punjenja spremnika ulaže energija, dok se u reverzibilnom procesu dobiva energija.

Klasični način spremanja solarne energije u obliku toplinske energije dulje vrijeme obavljao se preko dvaju odvojenih spremnika toplog i hladnog medija. Za vrijeme vršnog opterećenja kada bi bila potrebna veća snaga iz elektrane uz normalnu dobavu energije u obliku medija koji bi direktno stizao iz solarnih kolektora, iz toplog spremnika bi se mogao

crpiti dodatni dio energije te tako pripomogao u predgrijavanju zraka za generator pare u parnom ciklusu ili bi se koristio u izmjenjivaču za isparavanje nekog drugog radnog medija u npr. ORC-u.

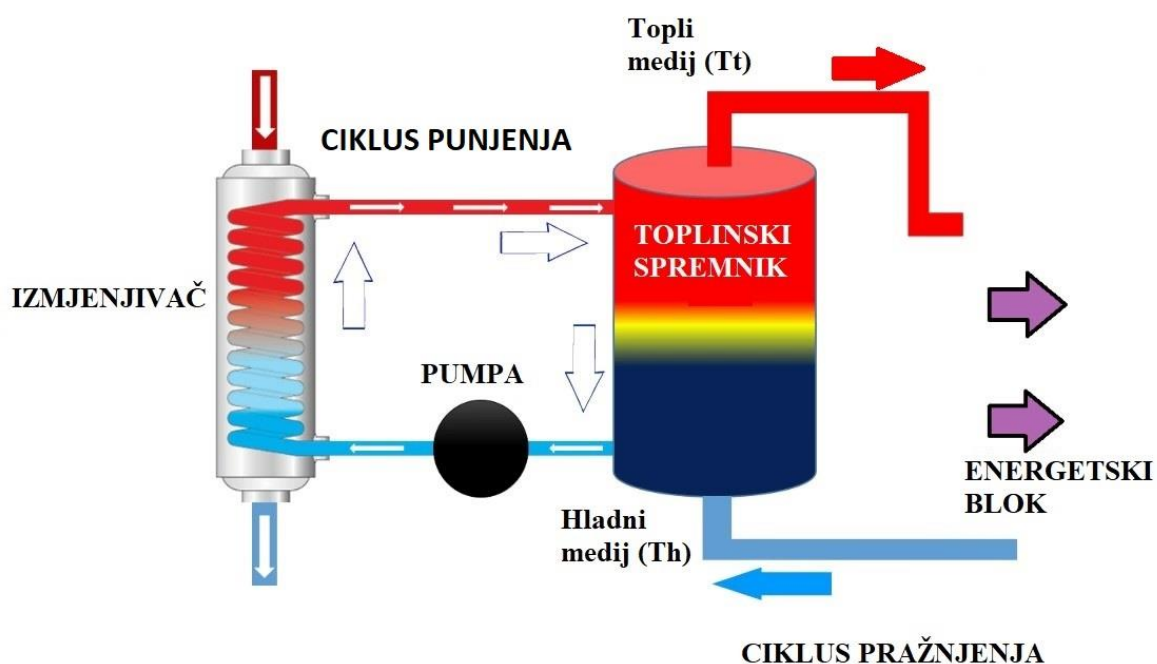


Slika 5. Solarna termoelektrana s paraboličnim kolektorima te 2 toplinska spremnika

Na slici 5 prikazana je izvedba solarne termoelektrane s klasičnih 2 spremnika odvojenog toplog i hladnog medija. Ako se za spremanje toplinske energije koristi neki drugi medij koji ima bolja svojstva akumuliranja topline od radnog medija onda se između cirkulacijskih krugova postavljaju dodatni izmjenjivači topline, što naravno poskupljuje postrojenje. Stoga se teži izvedbi s istim medijem koji prolazi kroz cijevi solarnih kolektora te koji se onda direktno može spremati u toplinske spremnike.

#### 4. TERMOKLINSKI TOPLINSKI SPREMNİK

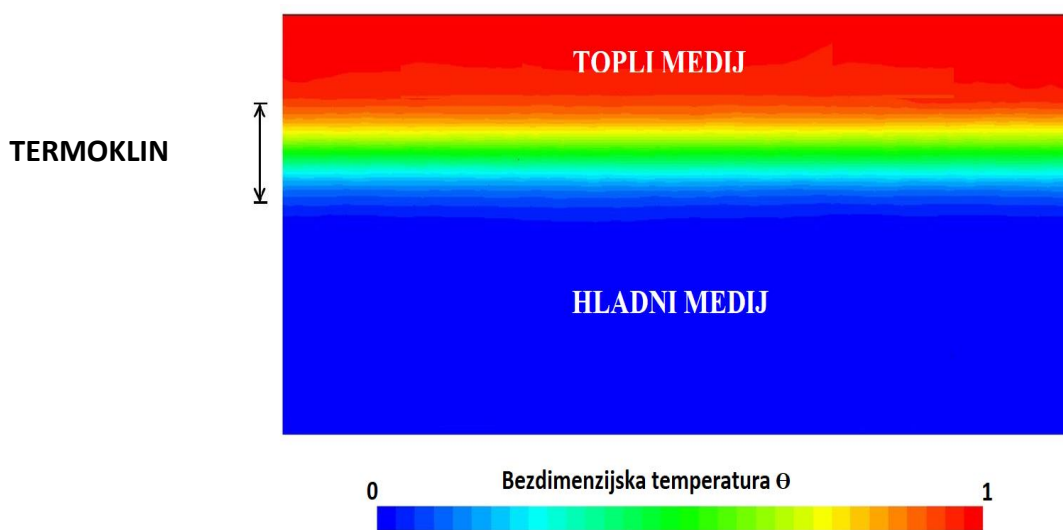
Pored klasičnih odvojenih spremnika u razvoju je već nekoliko godina termoklinski toplinski spremnik (slika 6). Zamjena klasičnih odvojenih toplo-hladnih spremnika jednim termoklinskim spremnikom svakako je od velikog značaja obzirom na to da bi se time smanjio trošak sustava spremanja toplinske energije za 33% ako se u tom slučaju 50-70 % količine medija može zamijeniti sekundarnim jeftinijim materijalom[8]. Usporedbe radi, veličina jednog termoklinskog spremnika morala bi biti malo veća od jednog spremnika u 2-sustavnoj izvedbi. Iako termoklinski spremnici imaju velik potencijal u snižavanju cijene sustava skladištenja energije, u njihovom radu još uvijek postoje problemi oko regulacije te nisu tako česta pojava u praksi.



Slika 6. Termoklinski toplinski spremnik i ciklusi

Na slici 6. vidi se dio cirkulacijskog kruga medija koji dolazi ugrijan iz cijevi solarnih kolektora te predaje toplinu mediju koju se sprema u termoklinski toplinski spremnik te koristi dalje za tehnološki proces dobivanja pare u energetsom bloku.

Za razliku od klasičnih načina pohrane toplinske energije u fizički odvojenim spremnicima toplog i hladnog medija (slika 1), u termoklinskom spremniku ujedno se nalazi topli i hladni medij koji su odvojeni slojem visokog gradijenta temperature (termoklin). Termoklin nastaje na temelju razlike gustoća toplog i hladnog fluida zbog koje se stvara barijera između dva izotermna područja. Taj međusloj zaslužan je za ostvarivanje stratifikacije temperature fluida u spremniku te njegovo pravilno funkcioniranje.



Slika 7. Temperaturni profil termoklina

Zbog takvih svojstava u ovakvim se spremnicima mora osigurati što dulja postojanost stratifikacijskog sloja te se mora regulirati brzina i način ulaska/izlaska fluida prilikom pražnjenja i punjenja koja bi mogla uzrokovati vrtloženja te nepotrebno miješanje toplog i hladnog medija. Zbog regulacije strujanja unutar spremnika implementirao se sustav s difuzorima koji omogućavaju jednoličniji raspored strujanja medija.

Osim difuzora u termoklinske spremnike ulaže se sekundarni materijal („punjenje“) koji prirodni efekt termoklina još više pojačava zbog toga što odaje toplinu na okolni medij.

#### 4.1 Izvedbe termoklinskih spremnika

Prema istraživanju provedenom od strane Pacheco [9] trebalo bi se više težiti višim spremnicima manjeg promjera nego onima većeg promjera i manje visine. Osim toga u obzir treba uzet i broj spremnika potrebnih za neku elektranu. Manji broj spremnika značio bi manje, ali veće pumpe te manji broj cijevi i armature. Također, kod manjeg broja spremnika potrebna je i jednostavnija regulacija u usporedbi s većim brojem spremnika. Jedan veliki spremnik imao bi manji omjer površine prema volumenu te stoga i manje potrebe za izolacijom te kontrolom gubitaka topline, ali s druge strane zahtjevi za izgradnjom, puštanjem u pogon te održavanjem takvog spremnika mogli bi biti faktor zbog kojeg bi ta izvedba bila nepoželjna.

Glavne razlike u izvedbama termoklinskih spremnika osim već navedenih konstrukcijskih su one temeljene na razlici u materijalima koji se koriste kao primarni i sekundarni materijal. U nastavku će se spomenuti samo oni materijali koji su prihvaćeni u komercijalnom smislu te provjereni da se povoljno ponašaju u uvjetima eksploatacije.

##### PRIMARNI MATERIJAL (FLUID)

Izbor primarnog materijala kao glavnog medija prijenosa topline uvelike utječe na korisnost parnog ciklusa jer temperatura primarnog materijala utječe na parametre pare koji ulaze u turbinu. U prilogu 2. prema [10] navodi se tablica sa kemijskim i fizikalnim svojstvima primarnih materijala koji se koriste ili su se koristili. Danas su najsigurnije i najpovoljnije za upotrebu mješavine raznih soli koje nisu zapaljive na visokim temperaturama koje se moraju postizati ako se žele dobivati veće efikasnosti postrojenja. Neke od poznatijih su: Solarna sol ( $60\% \text{NaNO}_3 + 40\% \text{KNO}_3$ ), HITEC ( $53\% \text{KNO}_3 + 45\% \text{NaNO}_2 + 7\% \text{NaNO}_3$ ), HITEC XL ( $48\% \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 45\% \text{KNO}_3 + 7\% \text{NaNO}_3$ )

##### SEKUNDARNI MATERIJAL (PUNJENJE)

Ideja iza umetanja sekundarnog materijala u spremnik je ta da se dio primarnog materijala može zamijeniti jeftinijim sekundarnim materijalom koji ima slična termodinamička svojstva. Kao što je već navedeno, utjecaj sekundarnog materijala vidljiv je u pojačanju efekta termoklina, što u boljoj stratifikaciji, što u dugotrajnijoj postojanosti. Prema [11] kombinacija kvarcita i silicijskog pijeska najbolje se ponaša u uvjetima visoke temperature te dobro podnosi cikluse punjenja i pražnjenja. U zadnjih par godina počela se razmatrati ideja o zamjeni dijela sekundarnog materijala s materijalima čije bi se talište



nalazilo unutar raspona temperatura u toplinskom spremniku te bi se tako iskoristila njihova latentna toplina (PCM-Phase Change Materials). Međutim, u ovom radu nećemo se njima baviti jer nisu dovoljno istražene mogućnosti njihove primjene te ponašanje u termoklinskim spremnicima.

Osim različitih izvedbi ovakvih spremnika, zanimljivo je prikazati i dinamičke karakteristike procesa pražnjenja i punjenja istog.

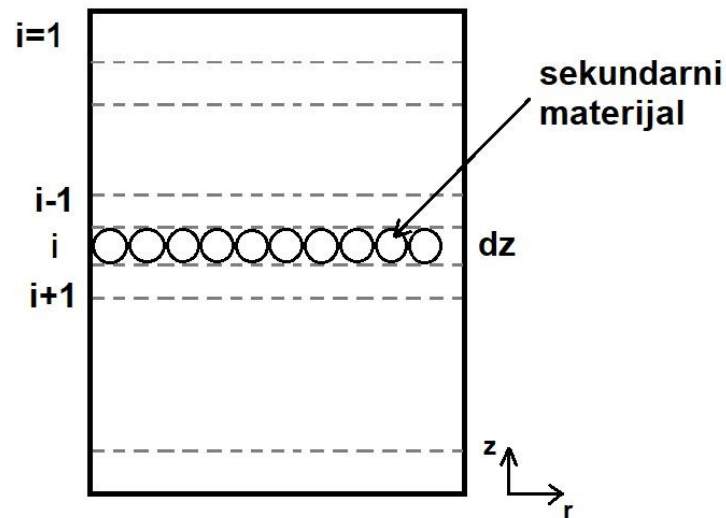
## 5. MATEMATIČKI MODEL

Za matematički model rada spremnika koristit će se jednodimenzijski model netermalnog ekvilibrijuma koji podrazumijeva i konstantnu prosječnu brzinu strujanja fluida unutar spremnika. Spremnik je diskretiziran na 100 kontrolnih volumena kako bi se dobili dovoljno točni rezultati za prikazivanje osnovnih značajki rada termoklinskog spremnika.

Prema [12] uvedena su neka pojednostavljenja i pretpostavke kako bi se uštedjelo na računalnim resursima:

1. Strujanje fluida je uniformno raspoređeno u radijalnom smjeru čineći problem jednodimenzijskim i vezanim samo uz  $z$  koordinatu te visinu spremnika.
2. Sekundarni materijal kružnog je oblika te je idealno raspoređen po spremniku te je kroz njega zanemarena kondukcija jer su čestice u kontaktu samo u jednoj točki.
3. Strujanje je laminarno i nestlačivo.
4. Prema [13] može se smatrati se da je spremnik idealno izoliran te su sa strane stijenke adijabatski rubni uvjeti jer je dokazano da je gubitak topline prema okolini zanemariv.
5. Konstantna gustoća kako fluida tako i sekundarnog materijala

Na slici 8. prikazana je diskretizacija spremnika te slijed numeriranja kontrolnih volumena koji počinje od vrha spremnika.



Slika 8. Diskretizacija spremnika

## OSNOVNE JEDNADŽBE

Osnovne jednađbe utemeljene su na izmjeni topline između fluida koji prolazi kroz porozni sloj prizmi, prema [6].

### *Jednađba očuvanja energije fluida*

$$M_{f,i} c_{p,f} \frac{\partial T_{f,i}}{\partial t} = e_u - e_i \quad (1)$$

koja nakon detaljnijeg definiranja glasi

$$\rho_f c_{p,f} \varepsilon R^2 \pi dz \frac{\partial T_{f,i}}{\partial t} = \dot{m} c_{p,f} (T_{f,i+1} - T_{f,i}) - kA (T_{f,i} - T_{s,i}) \quad (2)$$

Izraz koji je formuliran za upotrebu u Simulinku:

$$\frac{\partial T_{f,i}}{\partial t} = \frac{U \cdot (T_{f,i+1} - T_{f,i})}{dz} - k \cdot S \cdot \frac{(T_{f,i} - T_{s,i})}{\rho_f c_{p,f} \varepsilon R^2 \cdot \pi} \quad (3)$$

***Jednadžba očuvanja energije sekundarnog materijala***

$$M_{s,i} c_{p,s} \frac{\partial T_{s,i}}{\partial t} = e_u - e_i \quad (4)$$

koja nakon detaljnijeg definiranja glasi

$$\rho_s c_{p,s} (1 - \varepsilon) R^2 \pi dz \frac{\partial T_{s,i}}{\partial t} = k A (T_{f,i} - T_{s,i}) \quad (5)$$

Izraz koji je formuliran za upotrebu u Simulinku:

$$\frac{\partial T_{s,i}}{\partial t} = \frac{k \cdot S \cdot (T_{f,i} - T_{s,i})}{\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot R^2 \cdot \pi} \quad (6)$$

gdje je, prema [14] k koeficijent prijelaza topline s fluida na sekundarni materijal i obrnuto;

$$k = 0,191 \cdot \frac{\dot{m} c_{p,f}}{\varepsilon \pi R^2} \cdot (Re)^{-0,278} \cdot Pr^{-2/3}; 5 < Re < 7000 \quad (7)$$

odnosno u preformuliranom obliku

$$k = 0,191 \cdot U \cdot \rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \left( \frac{U \cdot d \cdot \rho_f \cdot \varepsilon}{\mu_f (1 - \varepsilon)} \right)^{-0,278} \cdot Pr^{-2/3} \quad (8)$$

te S površina izmjene topline sekundara izražena po jedinici visine spremnika S:

$$S = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \pi \cdot R^2}{d} \quad (9)$$

Matematički model korišten je u softverskom paketu Matlab2017a te Simulinku iste verzije. U prilogu 3 i 4 nalaze se Matlab skripta te Simulink model prema kojemu su se ispitivale dinamičke značajke rada spremnika.

## 5.1 Dimenzioniranje spremnika

Ciklusi punjenja i pražnjenja od presudne su važnosti prilikom dizajniranja i optimizacije rada termoklinskog spremnika. Vrlo je bitno da se efekt termoklina održi do kraja ciklusa ako je moguće jer bi inače korisnost i isplativost ovakvog načina pohrane toplinske energije bila nedovoljna. Prirodno je za očekivati da će se zona termoklina širiti i zauzimati sve veći prostor kako vrijeme protječe jer strujanje fluida utječe na širenje topline na sve veći broj kontrolnih volumena. Spremnik je na početku ciklusa pražnjenja u potpunosti ispunjen toplim fluidom te se tijekom procesa fluid crpi s gornje strane, dok se hladni fluid upumpava s donje strane spremnika. Ciklus punjenja počinje sa spremnikom ispunjenim hladnim fluidom te se tijekom procesa fluid upumpava s gornje strane, a izlazi s donje strane te odlazi u izmjenjivač ili solarni kolektor kako bi se ugrijao.

Prilikom uspoređivanja odziva kod korištenja različitih materijala koristio se spremnik dimenzioniran za 4 MWh energije te maseni tok prilagođen korištenju spremnika za vrijeme vršnog opterećenja. Dimenzioniranje spremnika i određivanje masenog toka vršilo se na temelju zadanog kapaciteta spremnika i početnih materijala koji se nalaze u njemu; kombinacije Solarne soli kao fluida (primarnog materijala) te sekundarnog materijala koji se sačinjavao od kvarcnog kamena te silicijskog pijeska (za svojstva vidjeti prilog 2).

*Potrebni volumen*

$$V = \frac{E_T}{\varepsilon \rho_f c_{p,f}(T_t - 20) + (1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s}(T_t - 20)} = 20,05 \text{ m}^3 \quad (10)$$

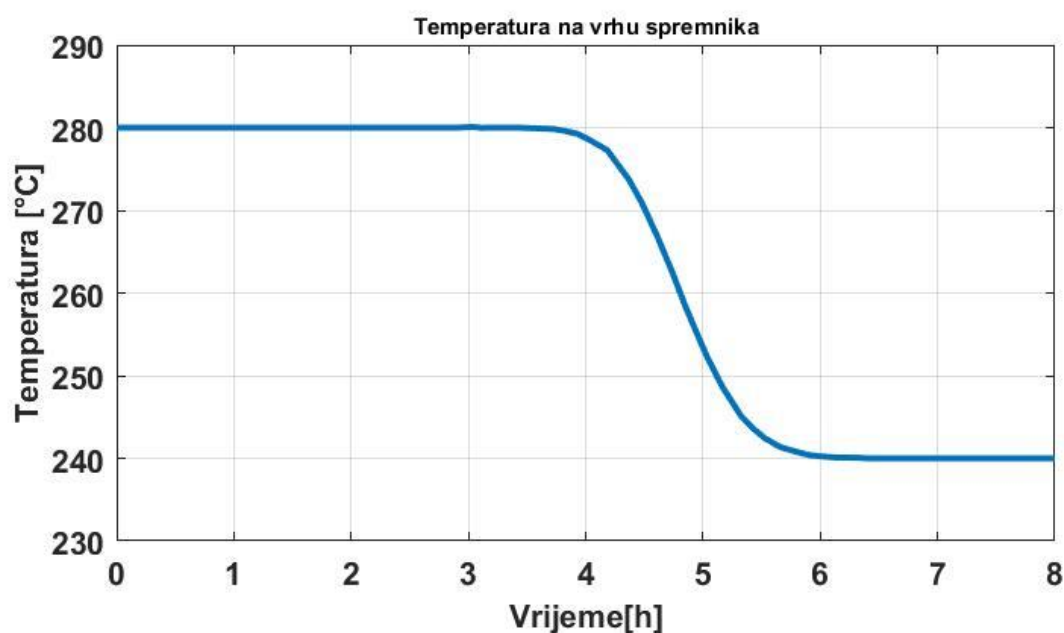
*Polumjer i visina spremnika proizašli iz volumena su  $R=1,17 \text{ m}$  i  $H=4,67 \text{ m}$ .*

Kako je vršno opterećenje veće za oko 30% od normalnog opterećenja te traje otprilike 4 h (16-20 h) maseni će se tok medija iz zadanog spremnika kapaciteta 4 MWh odrediti na način da spremnikov doprinos potraje otprilike koliko i povećana potreba. Toplinski tok koji izlazi iz spremnika svake sekunde tih 4 sata trebao bi tada biti  $\Phi = 1 \text{ MW}$ . Primjera radi će se prikazati postupak računanja potrebnog masenog toka fluida ako se za radni medij koristi Solarna sol čija je radna temperatura u spremniku 240-280 °C te normalna temperaturu okoliša 20 °C. Maseni tok dobiva se iz slijedeće jednadžbe:

$$\dot{m} = \frac{\Phi}{c_{p,f}\Delta T} = \frac{10^6}{1495 \cdot (280 - 20)} = 2,57 \text{ kg/s} \quad (11)$$

Kako se akumulirana energija nalazi i u sekundaru koji je statičan, uvijek će dio energije ostati u spremniku. Kao što je već spomenuto, sekundar služi održanju termoklina čiji je efekt puno bitniji od iskorištavanja energije koja se nalazi u punjenju, a ne može se iskoristiti. Iz ovog razloga neće biti moguće koristiti spremnik pri izračunatom masenom protoku već će se on morati smanjiti i prilagoditi da trajanje uistinu bude 4 sata. To će značiti manji izlazni tok iz spremnika te manji doprinos u snazi elektrane. Prilikom punjenja maseni tok koji se odvaja za pohranu energije u spremnik ovisit će o aktivnom dijelu elektrane te trenutnom opterećenju. Vrijeme punjenja najčešće se odvija u srednjem dijelu dana kada je potražnja niska.

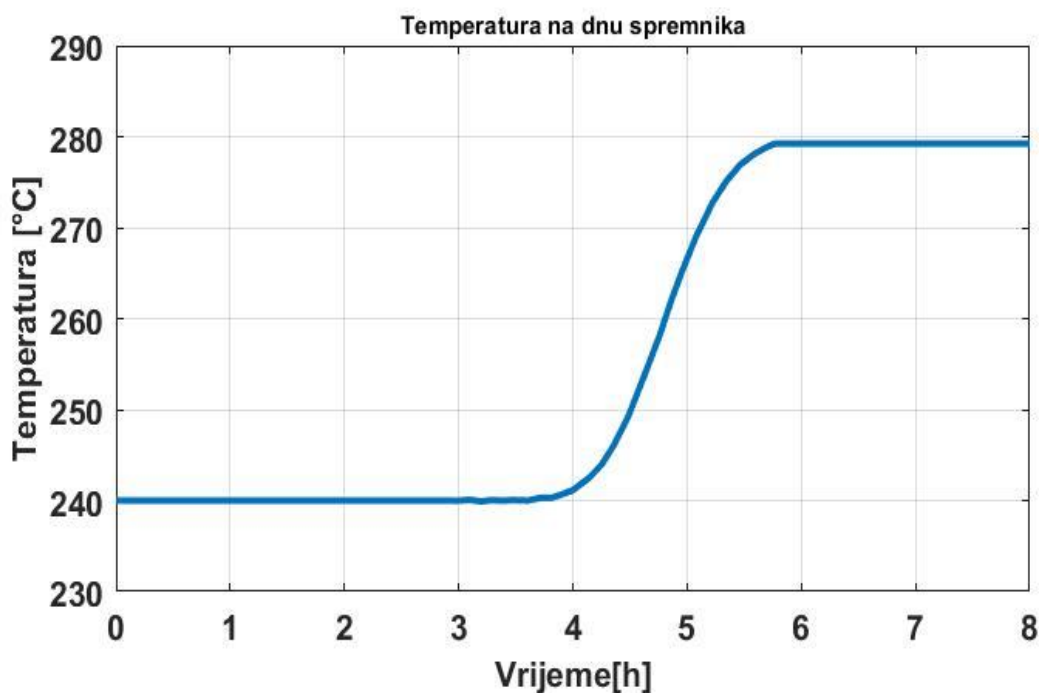
U slijedećem prikazu vidi se odziv temperature na izlazu iz spremnika koja slijedi iz navedenih vrijednosti korištenog masenog toka i radnog medija.



Slika 9. Odziv izlazne temperature tijekom pražnjenja

Iz već navedenih razloga maseni tok morao se smanjiti za 30 % kako bi spremnik potrajao 4 sata te iznosi u ovom slučaju  $m=1.8 \text{ kg/s}$ , a toplinski tok također je manji za 30% te iznosi 700 kW. Temperatura iznad 275 °C još uvijek je prihvatljiva za izlaznu temperaturu medija iz spremnika stoga se može zaključiti da bi spremnik stvarno pripomogao postrojenju za cijelo vrijeme trajanja vršnog opterećenja. U nastavku je priložen grafički prikaz punjenja

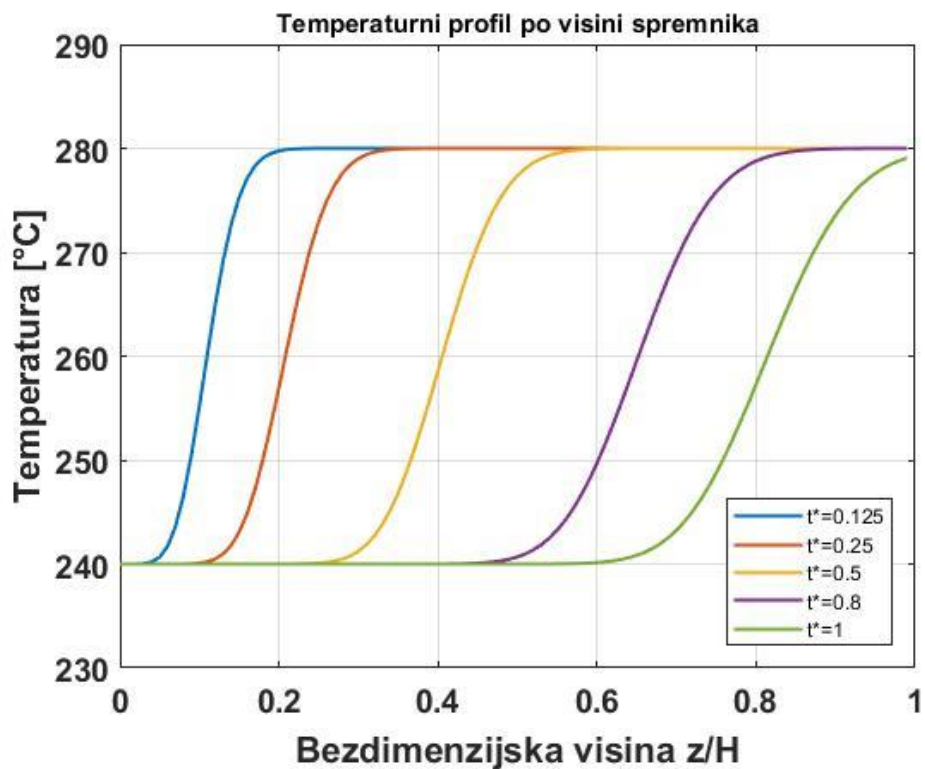
spremnika kod istog masenog toka od 1.8 kg/s. Iz grafa je vidljivo da će spremnik u potpunosti biti pun toplim medijem nakon 5.5 sati.



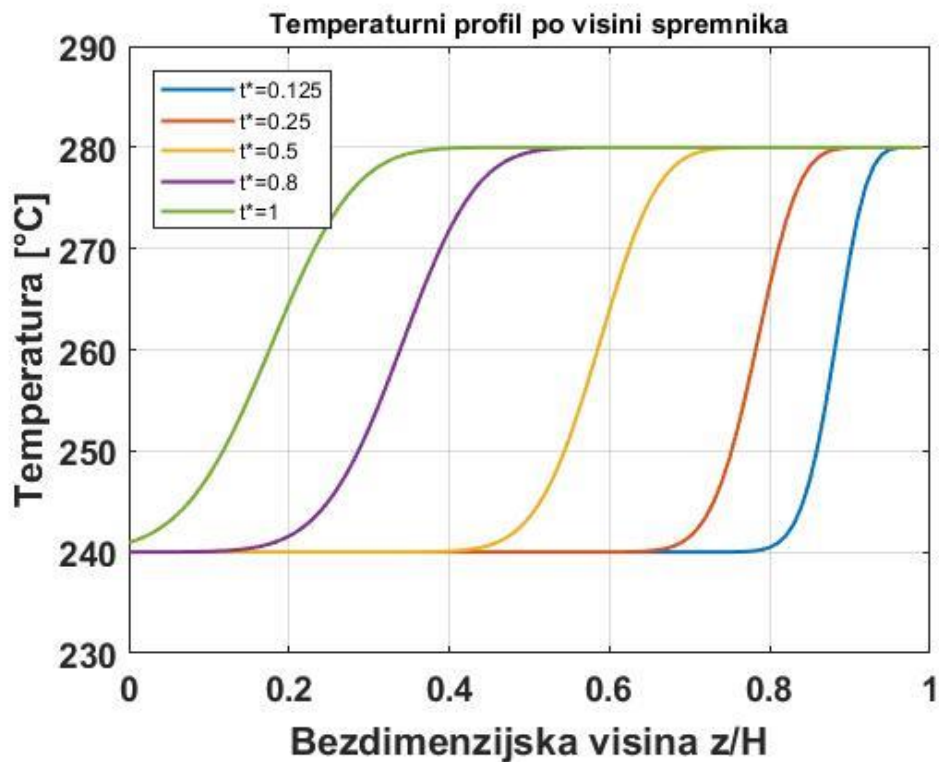
Slika 10. Ciklus pražnjenja

## 5.2. Temperaturni profil i termoklinski efekt

Već je spomenuto da se zona termoklina tijekom eksploatacije fluida iz spremnika širi te zauzima sve veći postotak visine u spremniku. Tijekom jednog ciklusa to ne bi trebalo utjecati na izlaznu temperaturu, ali kod neprekidnih izmjena ciklusa punjenja i pražnjenja termoklin gubi svoju definiciju te bi se tada u kritičnim slučajevima ovaj toplinski spremnik morao stavljati u mirovanje dok se termoklin opet ne ustali prirodnim putem. Ova posljedica te sami efekt termoklina vidljivi su u slijedećem prikazu temperaturnih profila (radi se još uvijek o istom mediju unutar spremnika).



Slika 11. Profil termoklina kod pražnjenja spremnika



Slika 12. Profil termoklina kod punjenja

Iz priloženog se može vidjeti da u početnim trenucima pražnjenja spremnika zona termoklina zauzima oko 18 % visine spremnika, tijekom procesa se povećava, dok pred kraj simulacije to područje iznosi 45 %. Ovo je nažalost jedan od problema koji se javljaju u termoklinskim spremnicima te se za njegovo rješavanje koriste različite izvedbe difuzora i ispituju razni materijali kao sekundarno sredstvo unutar spremnika.

Efekt degradacije termoklina utječe na izlaznu temperaturu koja se smanjuje zbog miješanja toplog i hladnog fluida, što za posljedicu ima smanjenje parametara pare koja odlazi u turbinu te smanjenje njezine učinkovitosti. S druge strane, ako tijekom punjenja spremnika izlazna temperatura naraste (u ciklusu punjenja donji otvor je izlaz te služi za odvod hladni medija na grijanje) tada će efikasnost solarnih kolektora padati. Također bi viša temperatura od predviđene za cirkulacijski krug punjenja mogla ostaviti štetne posljedice na cijevi, armaturu te mjerne uređaje.



## 6. REZULTATI PRORAČUNA

Termoklinski spremnici već su neko vrijeme u upotrebi te postoji više vrsta komercijalno dostupnih materijala s raznim svojstvima. Kod primarnog materijala (fluida) važna svojstva su gustoća, dinamička viskoznost te specifični toplinski kapacitet, a kod sekundarnog materijala (punjenja) osim gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta važna je poroznost (ovdje će se raditi o volumnoj poroznosti).

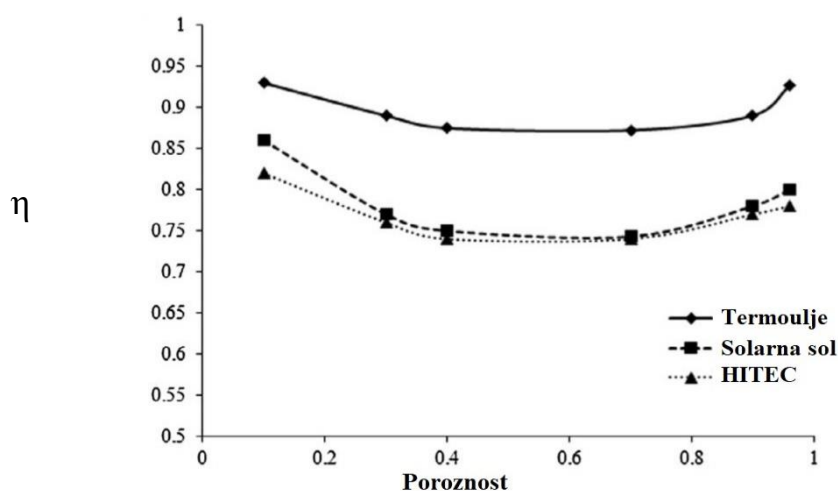
U ovome poglavlju će se pojasniti kako upotreba materijala različitih svojstava utječe na ponašanje spremnika u eksploatacijskim uvjetima. Kao materijal s kojim će se ostale kombinacije uspoređivati bit će Solarna sol i kvarcit/silicij (dosad korišteni za evaluaciju matematičkog modela i opis termoklina).

### UTJECAJ POROZNOSTI

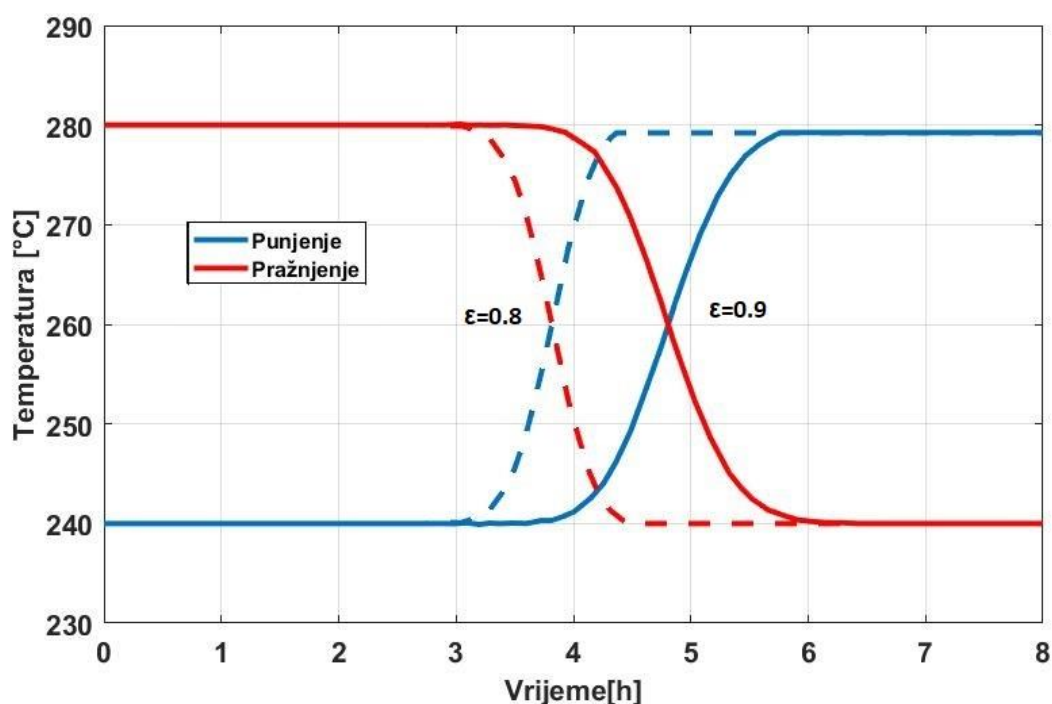
Prema istraživanju Reddy-a i suradnika[15] niže vrijednosti poroznosti materijala (do 0.3) i više vrijednosti (od 0.9) imaju za utjecaj bolju učinkovitost spremnika (oko 80 %), dok se srednje vrijednosti poroznosti veću za stupnjeve korisnosti od 75%. U oba slučaja toplinska iskoristivost termoklinskog spremnika ne spušta se ispod 74% (vidi sliku 13).

*Efikasnost toplinskog spremnika računa se prema izrazu*

$$\eta = \frac{\int_0^{t_{\text{praznjenja}}} \dot{m} c_{p,f} [T_{f,izl}(t) - T_h] dt}{\int_0^{t_{\text{punjenja}}} \dot{m} c_{p,f} [T_t - T_h] dt} \quad (12)$$



Slika 13. Učinkovitost pohrane energije



Slika 14. Utjecaj poroznosti na odziv temperature

Na slici 14. vidljiva je promjena vremenskog trajanja i kapaciteta spremnika. Pri vrijednostima poroznosti manjima od 0.9 očigledno je da će termoklinski spremnik moći kraće opskrbljivati energetske blok toplinskom energijom. S druge strane, to će imati za utjecaj brže punjenje spremnika. Toplinski spremnici se dimenzioniraju upravo za pripomoć kod vršnog opterećenja pa će se zato odabirati sekundarni materijali s onom vrijednošću poroznosti koja će pridonositi dovoljnom vremenu pražnjenja spremnika. Testiranje spremnika ovih dimenzija te protoka medija nije se moglo obaviti s niskim vrijednostima poroznosti jer bi model na taj način izašao iz uvjeta za  $5 < Re < 7000$  kod koeficijenta prijenosa topline.

### 6.1. Usporedba materijala

Za usporedbu rezultata modela uzet će se 3 kandidata primarnog materijala (Solarna sol, Termoulje VP-1 i HITEC) te 2 kandidata sekundarnog materijala (kombinacija kvarcit/silicij s osrednjenim vrijednostima svojstava te samo kvarcit). Razmotrit će se i primjena samo s primarnim medijem. Svojstva materijala priložena su u prilogu II.

Za mogućnost provjere odziva temperature po visini spremnika sve simulacije obavile su se za isto vrijeme trajanja od 4 sata te sa masenim protokom koji bi dao u svakom primjeru

jednaki toplinski tok (~700 kW) radi mogućnosti jasnije usporedbe svih materijala. Temperaturni raspon od 240 do 280 °C nalazi se unutar radnih temperaturnih granica svih ispitanih materijala stoga će se svaki slučaj ispitati baš s tim vrijednostima temperatura. Za prikaz koji daje uvid u moguće vrijeme eksploatacije vrijeme se produljilo na 8 sati kako bi se za konkurente s boljim svojstvima također mogao prikazati odziv u kojem se vidi pad temperature na izlazu iz spremnika. Primarna uloga toplinskog spremnika je pražnjenje stoga se ciklusi punjenja neće prikazivati za svaki od materijala posebno (ciklus punjenja prikazan je prije u radu).

### 1 ) Solarna sol

+

### kvarcit/silicij

$$\rho = 1899 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

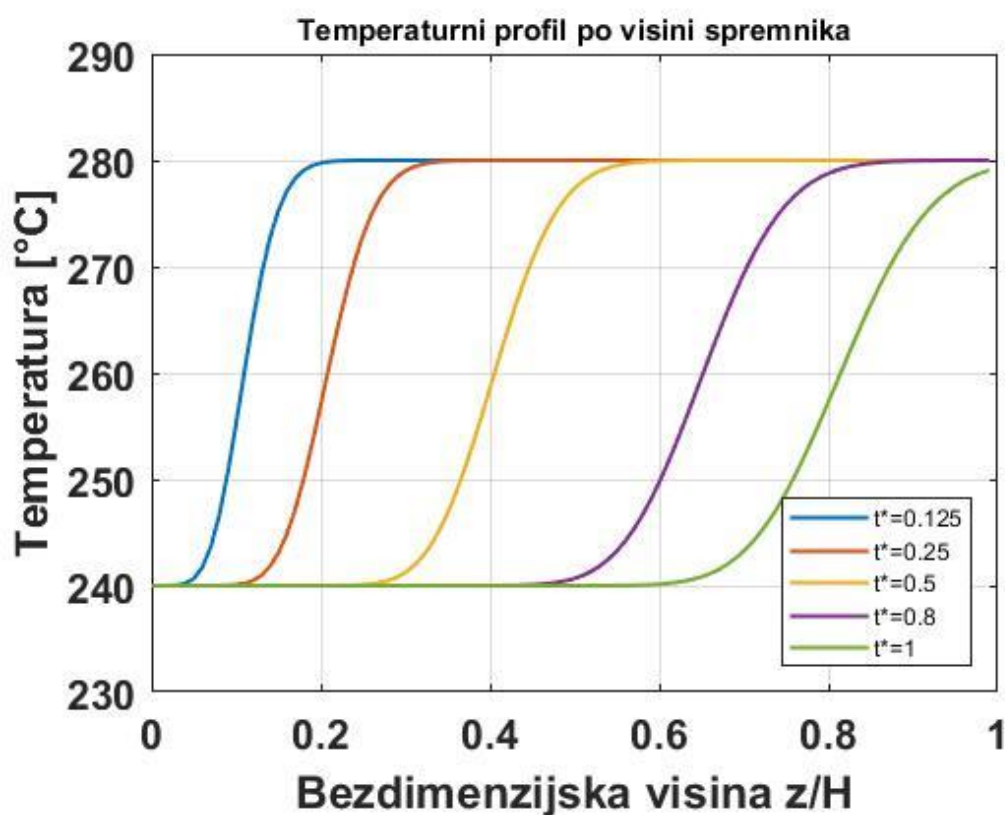
$$c_p = 1495 \text{ J/kgK}$$

$$c_p = 830 \text{ J/kgK}$$

$$\mu = 0.00326 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\lambda = 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$m = 1.8 \text{ kg/s}$$



Slika 15. Proces pražnjenja sa Solarnom soli

## 2) Termoulje VP1 + kvarcit/silicij

$$\rho = 815 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

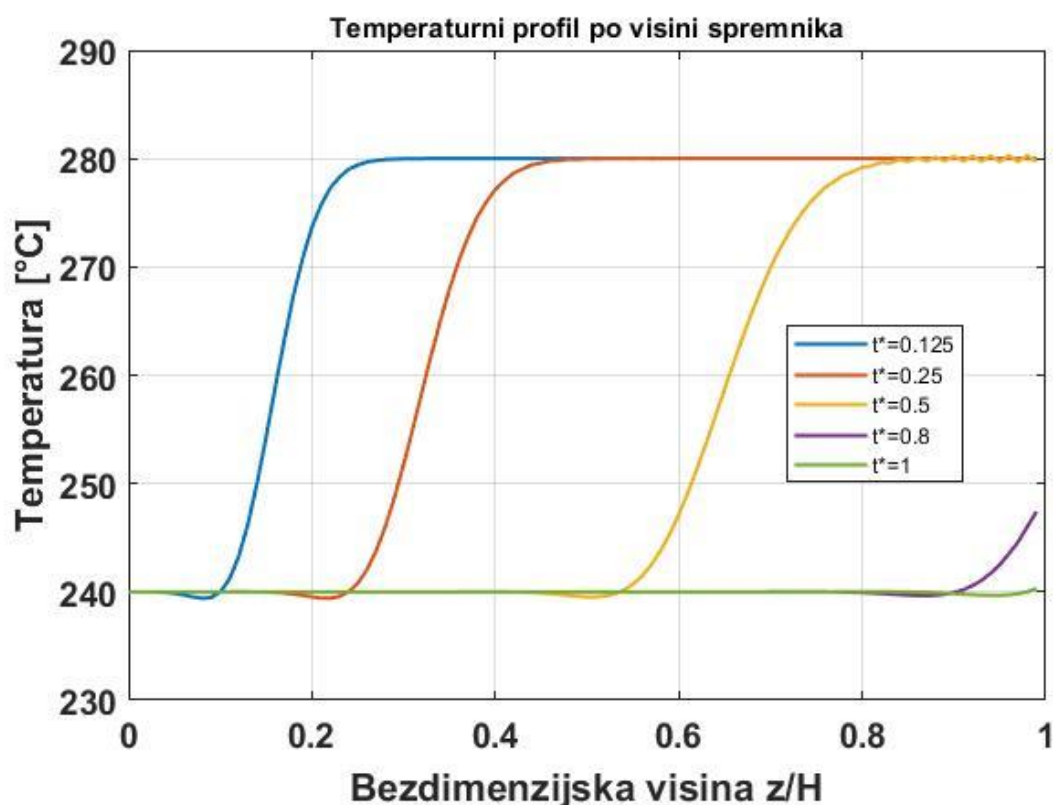
$$c_p = 2319 \text{ J/kgK}$$

$$c_p = 830 \text{ J/kgK}$$

$$\mu = 0.0004 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

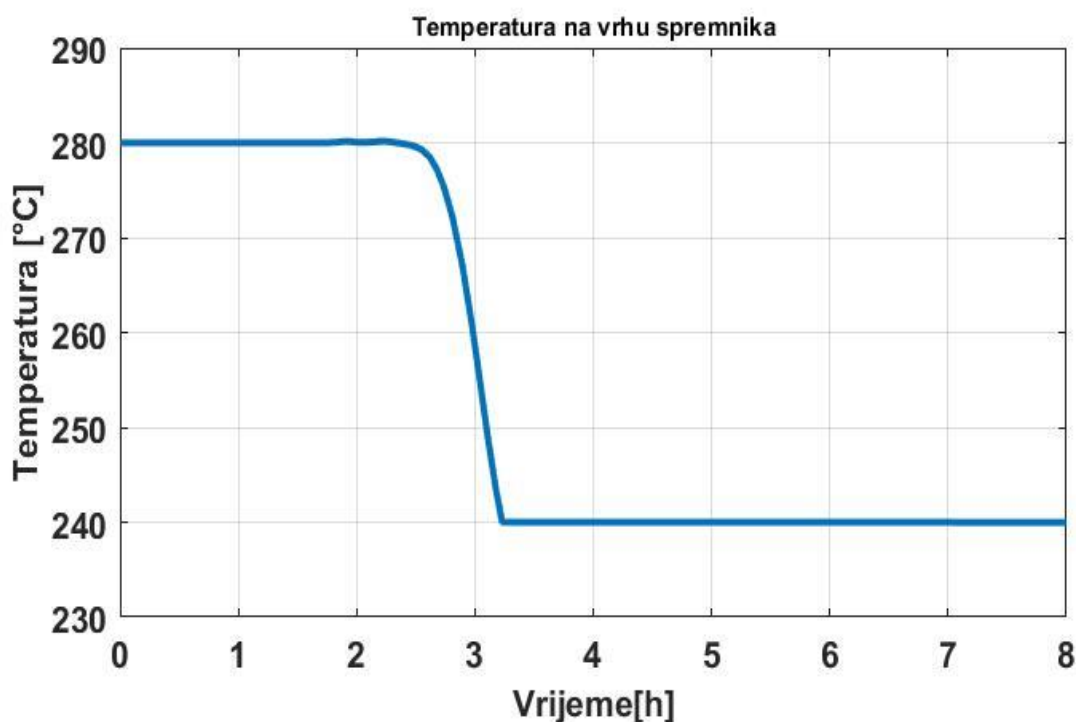
$$\lambda = 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$m=1.16 \text{ kg/s}$$



Slika 16. Proces pražnjenja s Termouljem

Usprkos smanjenom protoku očigledno je da spremnik s ovim termouljem ne bi držao temperaturu dovoljno dugo te bi vrijeme eksploatacije bilo kraće (ako bismo željeli isti toplinski tok). Na sljedećem dijagramu vidljivo je koliko bi točno sati termoklinski spremnik s Termouljem VP1 kao primarnim materijalom mogao sudjelovati za vrijeme vršnog opterećenja te pritom davati nominalni toplinski tok od 700 kW. Ako pogledamo cijenu navedenog termoulja može se zaključiti da je ono vrlo neisplativo za ovakav raspon temperatura. Njegova gornja radna temperatura nalazi se na 400 °C što znači da bi se taj materijal mogao više zagrijavati te koristiti u postrojenju gdje bi se dobivali viši parametri pare. Stoga, njegovu vrijednost trebalo bi ispitati u pravim pogonskim uvjetima predviđenim baš za taj medij.



Slika 17. Vremenski odziv izlazne temperature (Termoulje)

Na slici 17 prikazana je izlazna temperatura Termoulja VP1 te se može zaključiti da bi uz prihvatljivu temperaturu od 275 °C termoklinski spremnik s ovim medijem mogao opskrbljivati izmjenjivače u energetske blokove oko 2.5 sati što je prihvatljivo te bi za neko manje postrojenje bilo u redu gdje bi mogli smanjiti maseni protok medija iz spremnika (manji toplinski tok). Također se prema nagibu može ustanoviti da zona termoklina u ovom mediju veoma naglo putuje do vrha spremnika što se vidi prema naglom padu temperature nakon što se izlazna temperatura počne spuštati ispod 280 °C.

**3) HITEC**

+

**kvarcit/silicij**

$$\rho = 1640 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

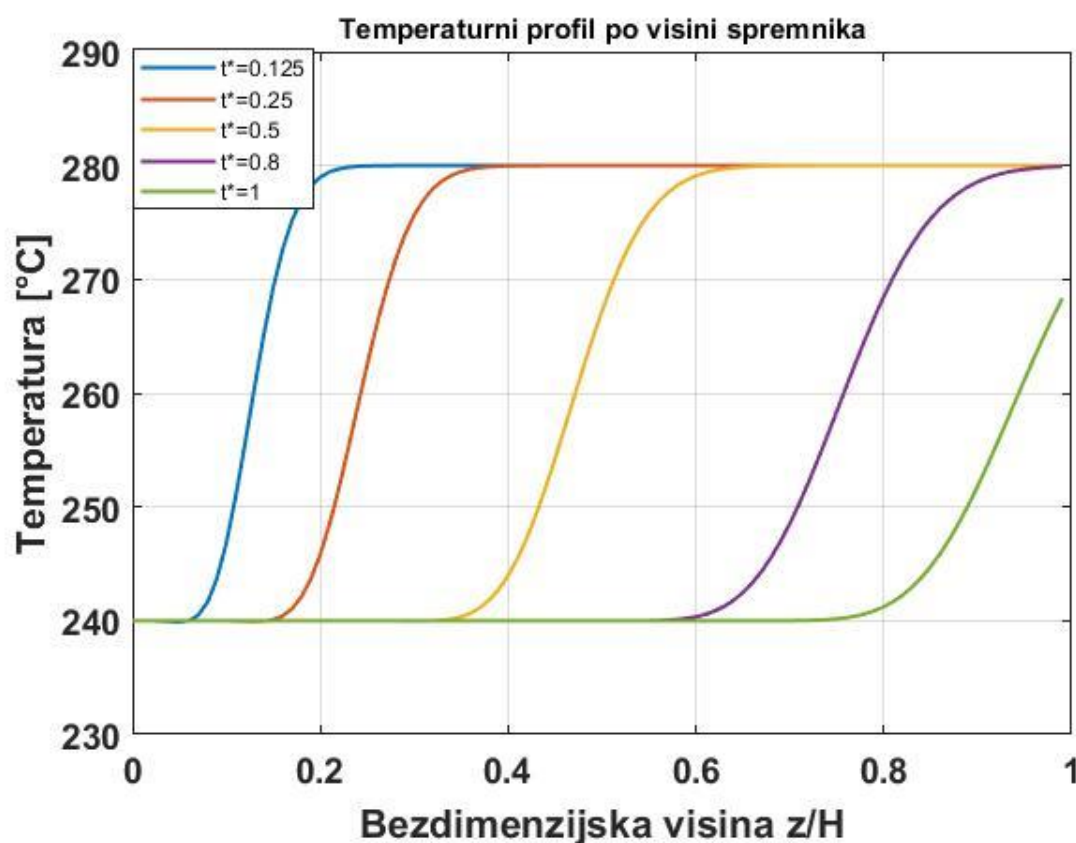
$$c_p = 1560 \text{ J/kgK}$$

$$c_p = 830 \text{ J/kgK}$$

$$\mu = 0.0004 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

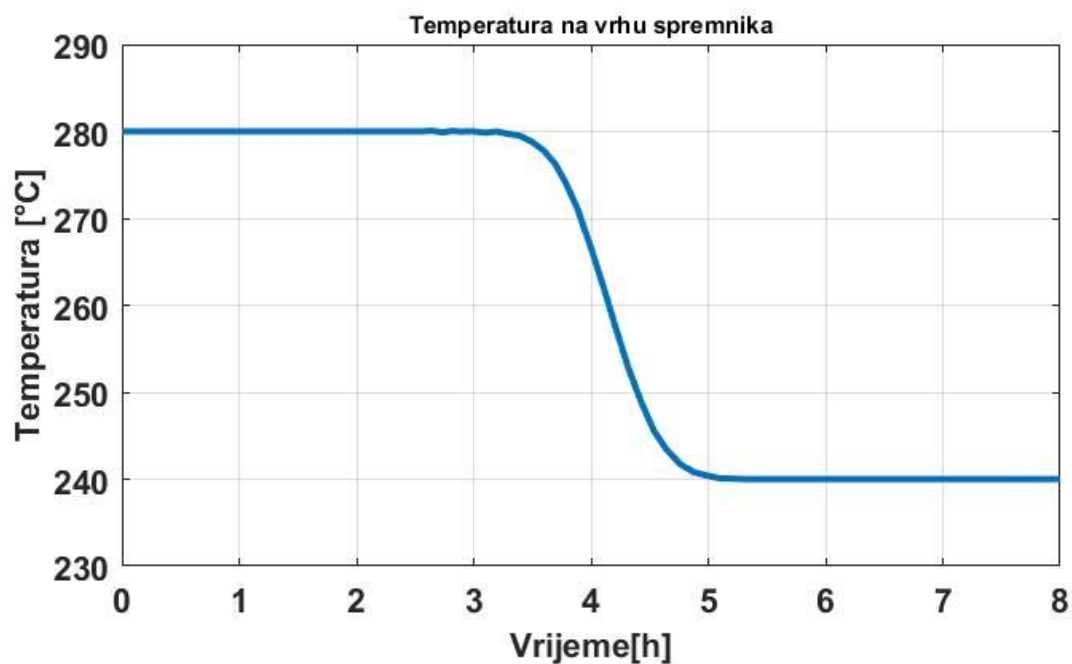
$$\lambda = 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$m=1.73 \text{ kg/s}$$



Slika 18. Proces pražnjenja s HITEC-om

HITEC ima slična svojstva kao Solarna sol, međutim odziv temperature pokazuje da bi pri kraju moguće eksploatacije vršnog opterećenja temperatura na izlazu bila nedovoljno visoka za proizvodnju pare. Na sljedećem dijagramu vidi se točno koliko dugo bi ovakva izvedba termoklinskog toplinskog spremnika mogla biti u pogonu (ciklusu pražnjenja). Iako spremnik s medijem većeg toplinskog kapaciteta od Solarne soli, njegova eksploatacija mogla bi trajati oko 3.5 sati.



Slika 19. Vremenski odziv izlazne temperature (HITEC)

#### 4) Solarna sol

+

#### kvarcit

$$\rho = 1899 \text{ kg/m}^3$$

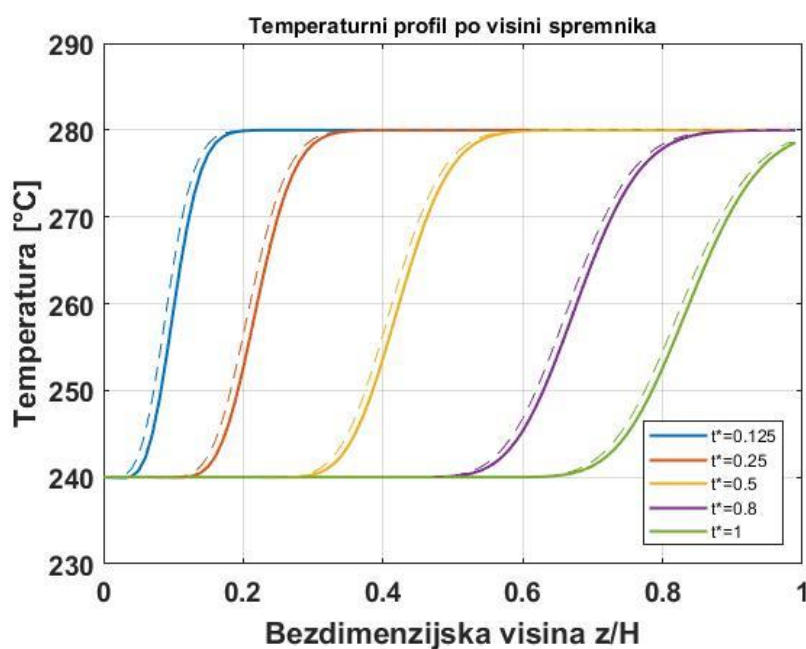
$$\rho = 2640 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1495 \text{ J/kgK}$$

$$c_p = 1050 \text{ J/kgK}$$

$$\mu = 0.00326 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

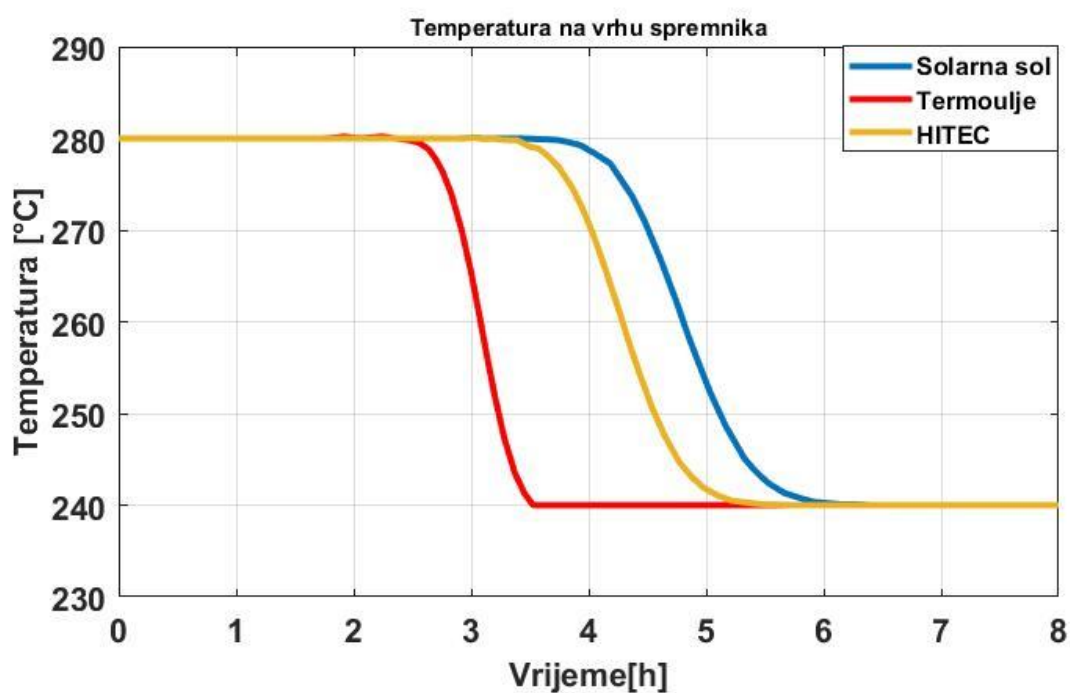
$$\lambda = 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$



Slika 20. Pražnjenje, Solarna sol i kvarcit

Na slici 20. vidljiv je odziv temperature tijekom pražnjenja uz izmijenjeni materijal sekundara. Usporedimo li ovaj odziv s onim na slici 15 vidljivo je da iako vrlo slična svojstva sekundarnog materijala nemaju preveliki utjecaj na odziv temperature, kombinacija kvarcita i silicija doprinosi boljem radu termoklinskog spremnika te mu omogućuje dulje vrijeme eksploatacije i pražnjenja. Također je na ovom grafu prikazan odziv temperature sekundara (crtkana linija) koji kasni za onim od fluida jer se sekundarni materijal koji je statičan mora ohladiti prilikom nadolaska fluida niže temperature.

Ako se u toplinski spremnik sprema samo primarni materijal bez punjenja, tj. sekundarnog materijala svakako će se morati više investirati jer su, pogledamo li današnje cijene, sekundarni materijali jeftiniji od primarnih. Usporedni odziv izlazne temperature svih ispitanih slučajeva vidljiv je na sljedećem prikazu.



Slika 21. Usporedba odziva sa svim materijalima



## 7. ZAKLJUČAK

Matematički model predstavljen u ovome prilagođen je za prikaz osnovnih značajki rada termoklinskog spremnika te usporedbu različitih materijala, no za detaljnije analize bilo bi od koristi primijeniti CFD analizu. Najbolja svojstva prilikom rada spremnika pokazuje Solarna sol koja se može dulje vrijeme koristiti kao rezervni izvor energije. Cijena Solarne soli koja je upola manja od slijedećeg po redu konkurentnog medija HITEC-a također upućuje da bi se njezino korištenje u toplinskim spremnicima najviše isplatilo. Utjecaj sekundarnog medija na dinamiku rada spremnika potrebno je naglasiti jer se cijena pohrane toplinske energije može dodatno smanjivati zamjenom primarnog medija s jeftinijim sekundarnim.

Uzevši u obzir provedene simulacije, rad termoklinskih spremnika pokazuje da su oni konkurentni pored klasične izvedbe pohrane energije s 2 odvojena spremnika ako tijekom neprekidnih ciklusa punjenja i pražnjenja termoklinska zona ne degradira.

---

## LITERATURA

- [1] International Energy Agency. 2DS-hiRen Scenario, Energy Technology Perspectives; 2012.
- [2] Top 5 Largest Solar Power Plants of the World, <https://www.solarinsure.com/largest-solar-power-plants>, (27.6.2017)
- [3] "Mahindra Susten to build India's 1st battery-backed solar project in Andaman", Solar power: Mahindra Susten to build India's 1st battery-backed solar project in Andaman - The Economic Times,
- [4] B. Biermana, C. Treynora, J. O'Donnella, M. Lawrencea, M. Chandraa, A. Farvera, P. von Behrensa, W. Lindsayb, Performance of an Enclosed Trough EOR system in South Oman, SolarPACES 2013
- [5] Renewables Global Status Report, REN21, 2017
- [6] Abhat, A., *Revue Phys. Appl.*, 1980, 15, 477.
- [7] Herrmann, U., Kearny, D. W. (2002). Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 124, 145-152.
- [8] Libby C. Solar thermocline storage systems: preliminary design study, EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1019581
- [9] Pacheco, J., Showalter, S., and Kolb, W., "Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants," *Journal of Solar Energy Engineering*, Special Issue: Solar Thermal Power, Vol. 124, May 2002.
- [10] Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., Cable, R., Potrovitza, N., Blake, D., Price, H., 2003. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME* 125, 170-176
- [11] Van Lew, J. T., Li, P., Chan, C. L., Karaki, W., & Stephens, J. (2011). Analysis of heat storage and delivery of a thermocline tank having solid filler material. *Journal of Solar Energy Engineering*, Transactions of the ASME, 133(2), [021003].
- [12] Libby C. Solar thermocline storage systems: preliminary design study, EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1019581
- [13] T. E. W. Schumann, "Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 208, no. 3, pp. 405-416, 1929.
- [14] K.S. Reddy, V. Jawahar, S. Sivakumar, T.K. Mallick, Performance investigation of single-tank thermocline storage systems for CSP plants, *Solar Energy* 144 (2017) 740–749

**PRILOZI**

- I. Izvadak iz referencirane literature [5]
- II. Skripta za izračun volumena spremnika
- III. Matlab skripta
- IV. Simulink model

## I. Izvadak iz referencirane literature [5]

Table 2 Characteristics of the nitrate salts and Therminol VP-1

Property	Solar Salt	Hitec	Hitec XL (Calcium Nitrate Salt)	LiNO <sub>3</sub> mixture	Therminol VP-1 biphenyl/diphenyl oxide
Composition, %					
NaNO <sub>3</sub>	60	7	7		
KNO <sub>3</sub>	40	53	45		
NaNO <sub>2</sub>		40			
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>			48		
Freezing point, °C	220	142	120	120	13
Upper temperature, °C	600	535	500	550	400
Density @ 300°C, kg/m <sup>3</sup>	1899	1640	1992		815
Viscosity @ 300°C, cp	3.26	3.16	6.37		0.2
Heat capacity @ 300°C, J/kg-K	1495	1560	1447		2319

Table 3 Effective storage fluid cost

Salt	Temperature Rise °C	Cost per Kg \$/kg	Storage Cost \$/kWh
Hitec <sup>a</sup> [142°C]	200	0.93	10.7
Solar Salt <sup>b</sup> [220°C]	200	0.49	5.8
Calcium Nitrate	200	1.19	15.2
[HitecXL] [120°C]	150	1.19	20.1
	100	1.19	30.0
Therminol VP-1 <sup>d</sup>	100	2.2	57.5

Notes: a. 7:53 Na/K nitrate, 40 Na nitrite c. 42:15:43 Ca/Na/K nitrate  
b. 60:40 Na/K nitrate d. biphenyl/diphenyl oxide

methods for piping, fittings, HCEs, and ball joints; and recovery from freeze incidents. For example, an innovative approach using impedance heating for freeze protection of the HCE, in contrast to an external heating coil, was deemed to be feasible. Ball joint freeze protection, on the other hand, was left unresolved and requires further investigation.

Since the engineering issues regarding operation of a trough solar plant using molten salt in the solar field pose worthy challenges, we turn our attention here to some of the more important considerations.

**Routine Freeze Protection Operation.** Since the freezing point of the considered salt is considerably higher than the freezing point of VP-1, special attention has to be dedicated to freeze protection methods. In principle, the same strategy as in the SEGs plants can be applied for freeze protection overnight:

1. The HTF is circulated at a low flow rate through the solar field during the night as required. By this means, the piping will be kept warm, thus avoiding critical thermal gradients during start up.
2. If the HTF temperature falls below a certain value, then an auxiliary heater is used to maintain a minimum temperature of 150°C.

According to the results of annual performance calculation the annual fuel consumption for freeze protection will be about 2 million m<sup>3</sup> of Natural Gas for a 55 MW plant with molten salt as HTF. Assuming a gas price of \$0.081/m<sup>3</sup>, freeze protection will cost \$162,000/yr. This is small compared to the normal total O&M cost.

This procedure can be modified and improved slightly for systems with thermal storage. Assuming a cold storage temperature of about 300°C and a total salt mass of 2,000,000 kg (6-hr storage), the thermal capacity of the storage related to its freezing temperature is still more than 1200 MWh. Instead of using fossil energy to heat up the salt, salt from the cold tank can be taken to

keep the solar field and piping warm. Assuming heat losses of approximately 25 W/m<sup>2</sup> during night, the total heat loss of the solar field will be 10.7 MWh. Hence, the storage capacity of the cold tank is enough for 112 hr or 4.6 days of freeze protection operation. Of course, the cold tank has then to be heated up again at beginning of operation, which consumes solar thermal energy. On the other hand, fossil fuel can be saved. According to an annual performance calculation, a storage capacity of 1 hr is enough for freeze protection operation during the night. This is depicted in Fig. 1. In this figure, cooling curves for the solar field are shown for configurations with and without thermal storage. In the case without thermal storage the solar field reaches the critical temperature after 6 hr. Then a fossil heater has to maintain the temperature at 150°C. In the case of thermal storage, the energy of the cold tank is used for freeze protection. For a normal winter day the minimum temperature of the storage at start-up in the morning will be 250°C for a 1-hr storage and 280°C for 6-hr storage. The inlet temperature in the solar field is the same as the cold storage tank temperature. Hence, routine freeze protection operation can be done by the thermal storage. However, an auxiliary heater still must be installed in configurations with thermal storage in case of emergency.

**Solar Field Preheat Methods.** The heat collection elements and piping within a solar collector assembly require an electric heating system to perform the following functions: preheating prior to filling with salt to minimize transient thermal stresses; and thawing frozen salt following a failure in the salt circulation equipment.

**Heat Collection Elements.** Two methods have been proposed for the heat collection elements. The first is an impedance system,

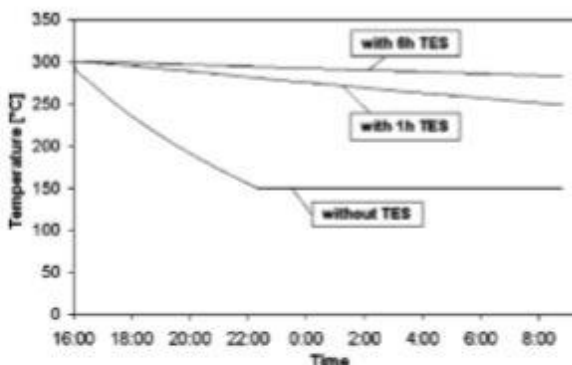


Fig. 1 Solar field cooling curves with salt HTF

## II. Skripta za izračun volumena spremnika

%Volumen spremnika

% E=4 MWh

E=4.e+06\*3600;

Tt=280; %°C

%gornja temp. medija

Th=240; %°C

%donja temp. medija

%primar1\_Solar salt (Reddy)

rof=1899; %kg/m3

cpf=1495; %J/kgK

%sekundar\_kvarcit/silicij

ros=2500; %kg/m3

cps=830; %kJ/kgK

eps=0.9;

V=E/(eps\*rof\*cpf\*(Tt-20)+(1-eps)\*ros\*cps\*(Tt-20));

Vs=V\*(1-eps);

R=nthroot(V/4/pi,3);

H=4\*R;

% V=20.048

% Približno:

% R=1.17; %m

%radijus spremnika

% H=4.67; %m

%visina spremnika

d=nthroot(6\*Vs/pi/37600,3);

%0.0467

### III. Matlab skripta

```
%konstante

%spremnik, V~20.048 m3)
R=1.17; %m
Height=4.67; %m
V=R^2*pi*Height; %m3
n=100;
dz=Height/n; %m
eta=0.9;
d=nthroot(6*V*(1-eta)/pi/37600,3); %m
sekundara("fillera")

m=1; %kg/s
Tt=280; %°C
Th=240; %°C
S=6*(1-eta)*pi*R^2/d; %m
sa sekundarom

k.volumena

%primar1_"Solar salt"_60%NaNO3+40%KNO3 (Reddy)
rof=1899; %kg/m3
cpf=1495; %J/kgK
mi=0.00326; %kg/m/s
Pr=(mi*cpf/0.57)^(-2/3);

%primar2_Therminol VP-1 (Reddy)
% rof=815; %kg/m3
% cpf=2319; %J/kgK
% mi=0.0004; %kg/m/s
% Pr=(mi*cpf/0.0865)^(-2/3);

%primar3_HITEC_53%KNO3+45%NaNO2+7%NaNO3 (Reddy)
% rof=1640; %kg/m3
% cpf=1560; %J/kgK
% mi=0.00316; %kg/m/s
% Pr=(mi*cpf/0.38)^(-2/3);
%beta=0.00031; %1/K

%sekundar_kvarcit/silicij
ros=2500; %kg/m3
cps=830; %kJ/kgK
lam_s=10; %W/m/K
Fn=100*0; %N
E=2.e+07; %Pa
H=lam_s*3/2*Fn*d/2/E; %W/K
%sekundar_kvarcit
%ros=2640; %kg/m3
%cps=1050; %kJ/kgK

%radijus spremnika
%visina spremnika
%volumen spremnika
%broj kontr. volumena
%visina kontr. volumena
%poroznost
%promjer

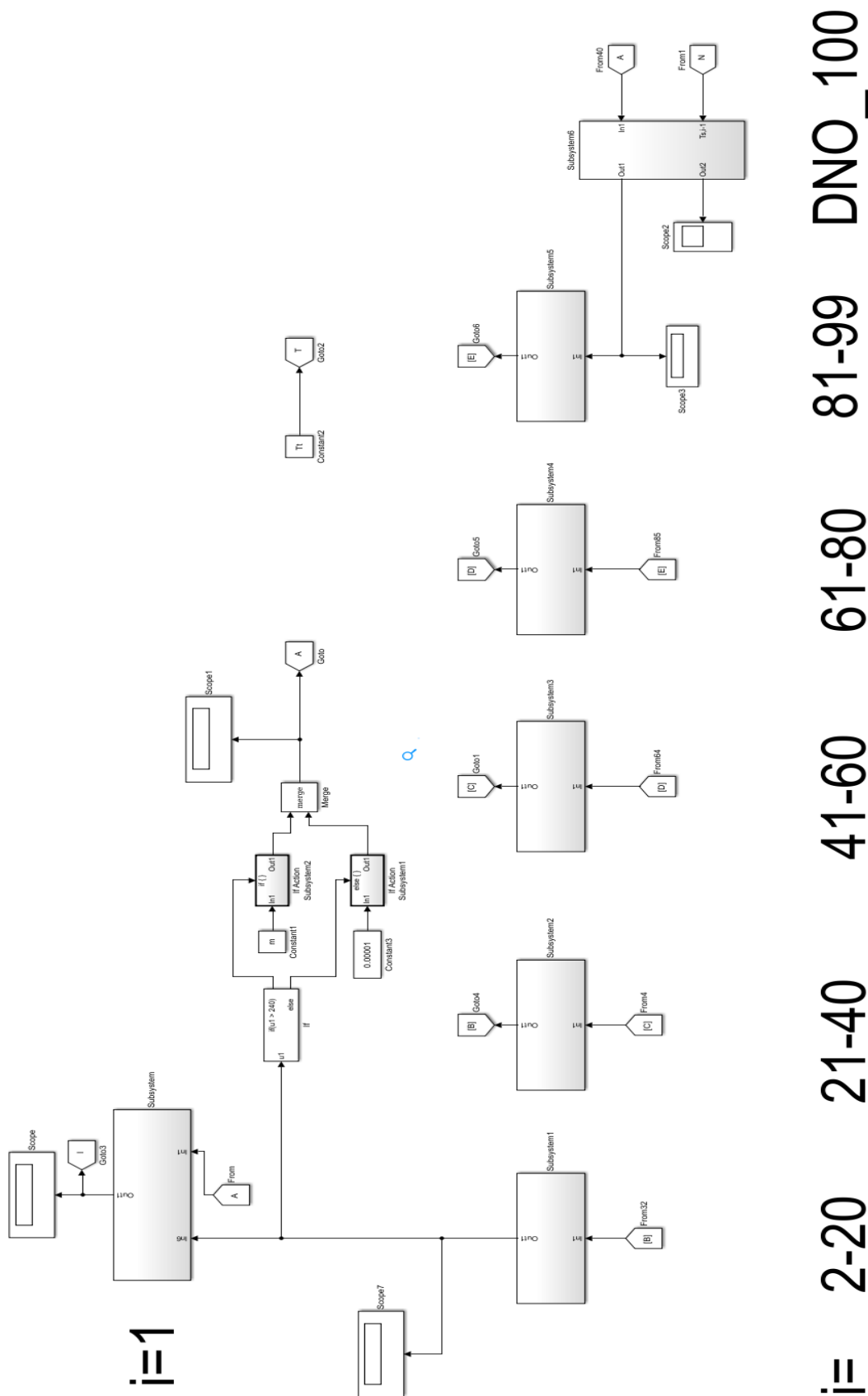
%ulaz/izlaz fluida
%gornja temp. medija
%donja temp. medija
%površina izmjene topline

%izražena po visini

%provodljivost
%normalna sila kontakta
%Youngov modul

U_brzina_mm_s=m/R^2/pi/rof/eta*1000;
```

## IV. Simulink model (opći pogled)



## Model jednog kontrolnog volumena

